



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Compuestos hidrofóbicos y actividad microbiológica en Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia

Bibiana Caballero Mejia

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias
Medellín, Colombia
2013

Compuestos hidrofóbicos y actividad microbiológica en Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Antioquia, Colombia

Bibiana Caballero Mejia

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Geomorfología y Suelos

Director:

Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo, Profesor Titular, Escuela de Geociencias
Facultad de Ciencias

Línea de Investigación: Hidrofobicidad en Andisoles de Antioquia

Grupo de Investigación: Hidrofobicidad de suelos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Escuela de Geociencias

Medellín, Colombia

2013

*Al amor de mi vida, Huber Alexander
Vanegas Villa, por hacerme feliz, apoyarme y creer
siempre en mí.*

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mí Maestro Daniel Francisco Jaramillo Jaramillo por su confianza, dedicación, acompañamiento y en especial por compartir su sabiduría y apoyo incondicional durante la elaboración de éste trabajo.

De manera muy especial y sincera le agradezco a todos los profesores, compañeros, familiares y amigos que de una u otra manera estuvieron involucradas en éste proyecto: Orlando Ruiz, Walter Osorio, Carlos Peláez, Norberto Parra, Raúl Zapata, Miguel Acevedo, David Rodas, Alejandro Hurtado, Gladys Morales, Sandra Gómez, María Eugenia Bedoya, Estefanía Madrigal, Luz Nélida Loaiza, Ana Silvia Arboleda, César Velásquez, Juan Diego León, Hernán Córdoba, Ángel Giraldo, Jair Gaviria, Olga Montoya, Alberto Arias, Fernando García, Jaime Alzate, Diana Castaño y finalmente a mi familia y compañeros del Posgrado.

Reconocimientos

- Posgrado en Geomorfología y suelos.
- Laboratorio de Suelos de la Escuela de Geociencias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Laboratorio del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia.
- Laboratorio de Química Analítica.
- Laboratorio de Análisis Químico y Bromatológico de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Laboratorio de Paleoecología de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

Resumen

De la caracterización química y microbiológica de Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, se pueden resaltar los siguientes resultados:

Tal como se ha observado en anteriores trabajos, estos suelos también presentaron bajo nivel de fertilidad y cumplieron con todas las exigencias de las propiedades ándicas.

Presentaron alto contenido de materia orgánica, con bajo grado de humificación y de baja calidad. Además, no se encontró relación entre el contenido de carbono orgánico y la severidad de la repelencia al agua en el suelo.

Al someter el suelo a lavado con una mezcla de isopropanol-amoniaco se extrajo una gran cantidad de compuestos orgánicos, muchos de ellos reconocidos como hidrofóbicos en la literatura, aunque varios de ellos estuvieron en suelos vérticos humectables, sin generar repelencia al agua en ellos, lo que muestra que la manifestación de este fenómeno en el suelo no sólo requiere de la presencia de los compuestos hidrofóbicos en él. La mayoría de los compuestos removidos correspondieron a alcanos, ácidos y alquenos.

En los suelos se presentaron bajos contenidos y actividad de microorganismos, probablemente debido a la calidad de la materia orgánica acumulada en ellos. Esta baja actividad microbial también podría ser la responsable, en parte, de la acumulación de la materia orgánica y de su bajo grado de alteración.

Se presentaron muy pocas correlaciones entre la severidad de la repelencia al agua en los suelos y las propiedades evaluadas en ellos, y la severidad de la repelencia, tanto real como potencial, puede ser evaluada satisfactoriamente utilizando las muestras del suelo secas al aire y a 105 °C.

Palabras clave: Andisoles, repelencia al agua, materia orgánica, compuestos orgánicos, actividad microbiológica.

Abstract

From chemical and microbiological characterization of water repellent Andisols basin of Piedras Blancas, you can highlight the following results:

As observed in previous studies, these soils also had low fertility and complied with all the requirements of andic properties.

Presented high content of organic matter, with low degree of humification and low quality. Furthermore, no relationship was found between organic carbon content and severity of water repellency in soil.

By subjecting the ground to wash with a mixture of isopropanol-ammonia was removed a large amount of organic compounds, many of which are recognized in the literature as hydrophobic, although several of them were in vertic soils wettable without generating water repellency on them, showing that the manifestation of this phenomenon on the ground not only requires the presence of hydrophobic compounds in it. Most compounds accounted removed alkanes and alkenes acids.

In soils and showed low levels of microorganisms activity, probably due to the quality of the organic matter accumulated in them. This low microbial activity could also be responsible, in part, from the accumulation of organic matter and its low degree of alteration.

There were very few correlations between the severity of water repellency in soils and the properties evaluated in them, and the severity of repellency, both actual and potential, can be assessed successfully using dry soil samples in air and 105 ° C.

Keywords.: Andisols, water repellency, organic matter, organic compounds, microbiological activity.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	IX
Lista de figuras.....	XIII
Lista de tablas.....	XV
1. Caracterización de la severidad de la repelencia al agua en el suelo	3
1.1 Introducción	3
1.2 Materiales y métodos.....	8
1.2.1 Caracterización del sitio experimental	8
1.2.2 Muestreo	10
1.2.3 Procedimiento	12
1.3 Resultados y discusión	13
1.4 Conclusiones	17
1.5 Bibliografía.....	17
2. Fertilidad y propiedades ándicas de los suelos	21
2.1 Introducción	21
2.2 Materiales y métodos.....	25
2.2.1 Caracterización del sitio experimental y muestreo.....	25
2.2.2 Procedimiento	25
2.3 Resultados y discusión	26
2.3.1 Propiedades relacionadas con fertilidad	26
2.3.2 Interpretación de la fertilidad para las muestras de Andisoles	29
2.3.3 Propiedades ándicas y relacionadas	31
2.4 Análisis de correlación	32
2.5 Conclusiones	35
2.6 Bibliografía.....	35
3. Caracterización de la materia orgánica en Andisoles repelentes al agua	39
3.1 Introducción	39
3.2 Materiales y métodos.....	43
3.2.1 Caracterización del sitio experimental y muestreo.....	43
3.2.2 Procedimiento	43
3.3 Resultados y discusión	44
3.3.1 Caracterización de la MOS.....	44
3.3.2 Análisis de correlación	48
3.4 Conclusiones	50
3.5 Bibliografía.....	50

4.	Caracterización de compuestos orgánicos extraídos con isopropanol – amoniacal en Andisoles repelentes al agua	55
4.1	Introducción.....	55
4.2	Materiales y métodos	58
4.2.1	Caracterización del sitio experimental y muestreo	58
4.2.2	Procedimiento.....	58
4.3	Resultados y discusión.....	60
4.3.1	Efecto del lavado con isopropanol – amoniaco sobre la severidad de la repelencia al agua en suelos.	60
4.3.2	Caracterización de los compuestos orgánicos extraídos de los suelos.....	63
4.3.3	Análisis de correlación	73
4.4	Conclusiones.....	75
4.5	Bibliografía	75
5.	Actividad microbiológica en Andisoles repelentes al agua.	79
5.1	Introducción.....	79
5.2	Materiales y métodos	84
5.2.1	Caracterización del sitio experimental y muestreo	84
5.2.2	Procedimiento.....	84
5.3	Resultados y discusión.....	88
5.3.1	Caracterización de la actividad microbiológica.....	88
5.3.2	Análisis de correlación	92
5.4	Conclusiones.....	94
5.5	Bibliografía	95
A.	Anexo1: Cromatogramas de los extractos de la muestras de Andisoles repelentes al agua de la cuenca media de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de <i>Pinus patula</i> , cobertura natural y suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar, lavados con una mezcla de isopropanol – amoniaco (7:3).....	99
	Anexo2: Lista de compuestos presentes en muestras de Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos con propiedades vérticas del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.....	100

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1 Parches de suelo hidrofóbico (H). Foto tomada de Jaramillo (1992).....	4
Figura 1- 2 Mapa general de la cuenca alta de la Quebrada Piedras Blancas y localización del lote experimental.	9
Figura 1-3 Aspecto general del lote La Chavarra.....	10
Figura 1- 4 Cuadrícula de muestreo.	11
Figura 1- 5 Distribución de las clases de severidad de la repelencia al agua en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana sometidos a dos temperaturas de secado (al aire y a 105 °C).....	15
Figura 2- 1 Andisol típico de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas. Foto facilitada por Jaramillo, D. F.	23
Figura 2- 2 Valores promedios de algunas propiedades químicas relacionadas con la fertilidad, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, teniendo como referente los niveles críticos altos propuestos por el ICA (1992).....	30
Figura 3- 1 Materia orgánica particulada repelente al agua, mezclada con agregados finos minerales repelentes y no repelentes al agua. Tomada de Jaramillo (2011c).	40
Figura 3- 2 Promedio de algunas propiedades de la materia orgánica en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de <i>Pinus patula</i> , y en algunos suelos vérticos del Carmen de Bolívar.	47
Figura 4- 1 Esquema general del procedimiento realizado para la extracción e identificación de los compuestos orgánicos encontrados en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en algunos suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.	59
Figura 4- 2 Distribución de las muestras secadas al aire y a 105 °C, por grado de severidad de la repelencia al agua, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de <i>Pinus patula</i> , antes y después de ser lavados con una mezcla de isopropanol-amoniaco 7:3 (n=21).....	61

Figura 4- 3 Cromatogramas de los extractos de la muestras (a) CP6 y (b) CP21 de Andisoles repelentes al agua de la cuenca media de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de <i>Pinus patula</i> , lavados con una mezcla de isopropanol – amoníaco (7:3).....	64
Figura 4- 4 Cantidad total de compuestos extraídos en Andisoles bajo cobertura de <i>Pinus patula</i> y natural de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.....	65
Figura 4- 5. Distribución de las familias de compuestos orgánicos presentes en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.	68
Figura 4- 6. Contenido de los alcanos en suelos repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.....	69
Figura 4- 7. Contenido de los ácidos en suelos repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.....	70
Figura 4- 8. Contenido de los alquenos en suelos repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.....	71
 Figura 5- 1 Actividades enzimáticas (a) FDA y (b) Fosfatasa alcalina en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.	 90

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1- 1 Clasificación de la persistencia de la repelencia al agua en el suelo, propuesta por Dekker y Jungerius (1990), tomada de Dekker (1998).	5
Tabla 1- 2 Clases de severidad de la repelencia al agua, medida con el método del MED expresado en % de alcohol, utilizadas por Dekker y Ritsema (1994) y Dekker (1998) en suelos arenosos de dunas de Holanda.....	6
Tabla 1- 3 Estadísticos básicos de la severidad de la repelencia al agua en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, sometidos a diferente temperatura de secado.	13
Tabla 1- 4 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua, en diferentes condiciones de secado, en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana (n = 29).....	16
Tabla 2- 1 Determinaciones y métodos de evaluación de las propiedades químicas y físicas estudiadas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 2006).	25
Tabla 2- 2 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la fertilidad en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula (n = 22).	27
Tabla 2- 3 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la fertilidad en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura natural (n = 3).....	28
Tabla 2- 4 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la fertilidad en algunos suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana, bajo diferentes coberturas (n = 4).....	29
Tabla 2- 5 Estadísticos* básicos de las propiedades ándicas y afines en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula y cobertura natural (n=24).	33
Tabla 2- 6 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua, la fertilidad natural y las propiedades ándicas y afines, en diferentes condiciones de secado, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula y natural (n = 24).....	34

Tabla 3- 1 Estadísticos* básicos de algunas propiedades de la materia orgánica en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula (n =22).....	44
Tabla 3- 2 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura natural (n=3) y en suelos vérticos del Carmen de Bolívar (n=4).....	46
Tabla 3- 3 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua y algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula y natural (n = 25).....	48
Tabla 3- 4 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua y algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula (n = 22).	49
Tabla 3- 5 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua y algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica, en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana (n = 4).....	49
Tabla 4-1 Estadísticos básicos que caracterizaron el efecto del lavado con isopropanol - amoniaco sobre la severidad de la repelencia al agua de las muestras secadas al aire y a 105 °C, antes y después de la extracción, bajo cobertura de Pinus patula, en la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño. (n=21*).	60
Tabla 4- 2 Severidad de la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de Pinus patula (n=22) y natural (n=3) de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana, antes y después de ser lavados con una mezcla de isopropanol - amoniaco (7:3).....	62
Tabla 4- 3 Compuestos presentes con mayor frecuencia en muestras de Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.	66
Tabla 4- 4 Compuestos presentes únicamente en suelos vérticos del Carmen de Bolívar (n=3).	67
Tabla 4- 5 Coeficientes de correlación lineal significativos ($p < 0.05$) entre la severidad de la repelencia al agua y los compuestos orgánicos extraídos en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula y natural (n = 24).....	74
Tabla 5- 1 Composición* de los medios de cultivo selectivos para aislar microorganismos en grupos funcionales.....	86
Tabla 5- 2 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la actividad microbiológica en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula (n =22).	88

Tabla 5- 3 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la actividad microbiológica en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura natural (n=3).....	89
Tabla 5- 4 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la actividad microbiológica en suelos vérticos del Carmen de Bolívar (n=4).....	91
Tabla 5- 5 Coeficientes de correlación lineal significativos ($p < 0.05$) entre indicadores de actividad microbiológica y algunas propiedades de los Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de Pinus patula y natural (n = 24).....	93

1. Caracterización de la severidad de la repelencia al agua en el suelo

1.1 Introducción

Al definir un suelo como hidrofóbico, en realidad no se quiere decir que es completamente repelente al agua, aunque sí se da este caso; lo que se quiere expresar con esta connotación es que el suelo es difícil de humedecer, o sea, que se demora un tiempo en permitir la entrada del agua en él (Jaramillo, 1996).

La repelencia al agua en los suelos se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos en él, los que pueden producirse por el metabolismo y/o la descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales (Doerr *et al.*, 2000), por someter el suelo a incendios, quemas y calentamiento o secado (DeBano, 1981, 2000; Dekker y Ritsema, 2000) o por contaminar el suelo con petróleo y/o con sus derivados (Roy y McGill, 1998).

Todos los investigadores que han trabajado con suelos hidrofóbicos han concluido que la dificultad para humedecerlos se debe a la presencia de recubrimientos orgánicos hidrofóbicos que rodean sus partículas o sus agregados minerales (Jaramillo, 1992, 2011).

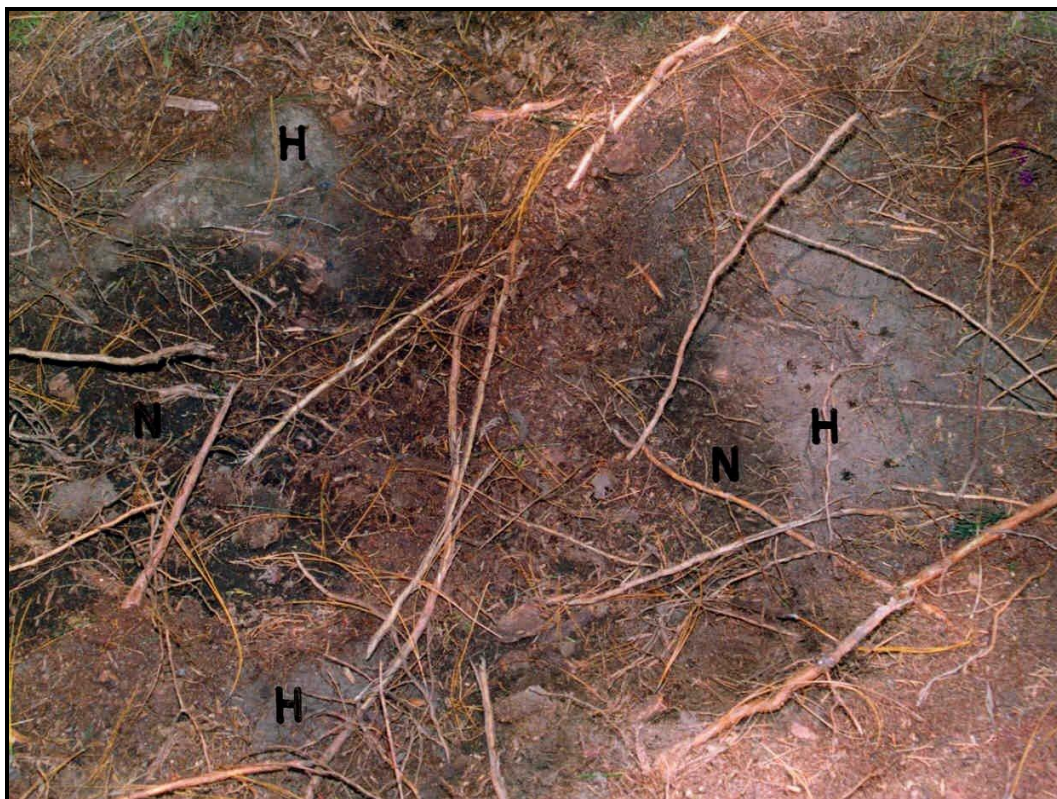
Una característica importante de los compuestos orgánicos que se asocian con la hidrofobicidad es que no presentan un grado de alteración muy avanzado, es decir, no corresponden con humus propiamente dicho, sino que se ubican más bien en el grupo de sus precursores (Jaramillo, 2011).

La hidrofobicidad se ubica, en el caso más común, en la parte superficial del suelo. Cuando él posee una capa de hojarasca, se ubica en el contacto entre los materiales

orgánicos y minerales, afectando preferencialmente la parte mineral del mismo, aunque la hojarasca también puede presentarse hidrofóbica (Jaramillo, 2003, 2005). Una forma frecuente de distribución de la repelencia al agua en el suelo es en parches: áreas de suelo hidrofóbico que alternan con cuerpos de suelo humectable (Figura 1-1).

Entre los efectos que ocasiona el fenómeno de la hidrofobicidad en el suelo se encuentran, principalmente, la erosión, el retraso en la infiltración, la generación de vías con flujos preferenciales y el transporte acelerado de agua y de contaminantes por ellas. Según Dekker y Ritsema (2000), la repelencia al agua tiende a incrementar la escorrentía y la erosión superficial, a la vez que disminuye el volumen de agua absorbida por el suelo y las tasas de infiltración son considerablemente bajas, comparadas con las que se presentan en suelos humectables.

Figura 1-1 Parches de suelo hidrofóbico (H). Foto tomada de Jaramillo (1992).



Con frecuencia, cuando se habla de hidrofobicidad, existen dos términos que se pueden interpretar como similares. Uno es la **severidad**, la cual se define como el grado de resistencia que opone el suelo al humedecimiento por el agua, durante un tiempo limitado de contacto entre las fases sólida y líquida (Roy y McGill, 2002), y el otro es la **persistencia**, definida por Watson y Letey (1970) como el tiempo que toma una gota de agua para ser absorbida completamente por el suelo.

Para clasificar la persistencia de la repelencia al agua de un suelo, se utiliza la propuesta por Dekker y Jungerius (1990), citados por Dekker (1998). Ellos distinguen cinco clases de persistencia de la repelencia al agua, evaluada con el método que mide el tiempo que gasta una gota de agua en penetrar completamente en el suelo (WDPT) (Tabla 1- 1).

Tabla 1- 1 Clasificación de la persistencia de la repelencia al agua en el suelo, propuesta por Dekker y Jungerius (1990), tomada de Dekker (1998).

Clase	WDPT (s)	Definición
0	< 5	Humectable; sin repelencia al agua
1	5 – 60	Repelencia al agua ligera
2	60 – 600	Repelencia al agua fuerte
3	600 – 3600	Repelencia al agua severa
4	> 3600	Repelencia al agua extrema

Para evaluar la severidad de la repelencia al agua, uno de los métodos más empleados es el (MED), propuesto por King (1981), en el cual la severidad se caracteriza con la molaridad de una solución de etanol que penetra completamente en el suelo en menos de 10 segundos. Dekker y Ritsema (1994) y Dekker (1998), evaluaron la severidad de la repelencia al agua en suelos arenosos de dunas de Holanda, utilizando una variante del MED donde se expresan los resultados de la determinación como el “porcentaje más bajo de alcohol de la solución que penetre en el suelo en 5 segundos o menos”. Con el fin de interpretar la medida de la severidad de la repelencia al agua de los suelos con el porcentaje de la solución de etanol, Dekker y Ritsema (1994) y Dekker (1998) la agruparon en las 6 clases que se aprecian en la Tabla 1- 2.

Tabla 1- 2 Clases de severidad de la repelencia al agua, medida con el método del MED expresado en % de alcohol, utilizadas por Dekker y Ritsema (1994) y Dekker (1998) en suelos arenosos de dunas de Holanda.

Clase	Severidad de repelencia al agua*	Valores del % de etanol en la solución (PE)
1	No repelente	0
2	Ligeramente repelente	1 – 3
3	Moderadamente repelente	4 – 6
4	Fuertemente repelente	7 – 14
5	Severamente repelente	15 – 20
6	Extremadamente repelente	> 20

*Ni las clases ni los nombres de la severidad de la repelencia al agua fueron propuestos por los autores de la clasificación: son propuestos por Jaramillo (2011).

En el desarrollo del método para evaluar la severidad de la repelencia al agua se han presentado variaciones en el tiempo recomendado como límite de penetración de la gota de solución de etanol en el suelo (King, 1981; Dekker y Ritsema, 1994; Roy y McGill, 2002). Jaramillo (2001), mediante análisis de regresión encontró que, en Andisoles, el tiempo límite de observación más adecuado era de 5 segundos.

Según Dekker (1998), al someter suelos hidrofóbicos a secamiento progresivo se va incrementando su grado de hidrofobicidad aunque en condiciones de humedad de campo pueden no presentar repelencia alguna.

Debido a lo anterior se han definido dos tipos de repelencia al agua en el suelo: una “**real**” que es la que se presenta en condiciones de humedad de campo, y una “**potencial**”, aquella que resulta cuando las muestras de suelo son secadas a alguna temperatura.

La hidrofobicidad se ha reportado en todo el mundo bajo diferentes condiciones climáticas, tipos de suelo y coberturas vegetales (Wallis y Horne, 1992; DeBano, 2000; Doerr *et al.*, 2000; Jaramillo *et al.*, 2000; Jaramillo, 2011).

En Colombia, Jaramillo en 1989 observó hidrofobicidad en Andisoles de la Cuenca de la quebrada Piedras Blancas, y también en Inceptisoles de los alrededores de Santa Rosa de Osos (Jaramillo y Herrón, 1991). Jaramillo (1992) encontró que más del 90 % de las muestras que estudió en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, en campo presentaron valores de WDPT mayores de 240 segundos, y alrededor del 82 % de dichas muestras presentó un WDPT > 10800 segundos en laboratorio, cuando se secaron al aire.

Varios Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas evaluados por Jaramillo (1992, 2003) y Jaramillo *et al.* (2000), bajo cobertura de *Pinus patula*, presentaron una repelencia extremadamente alta, con valores de WDPT > 10800 segundos en la mayoría de las muestras analizadas. Situación similar fue encontrada por Vanegas (2003), en suelos bajo plantaciones de *Pinus patula* y bajo cobertura natural con predominio de *Quercus humboldtii*, aunque en éste se presentó un menor grado de hidrofobicidad que en la cobertura de *Pinus patula*.

En otro trabajo realizado en dicha cuenca, Caballero (2005) mostró que existe una alta persistencia de la repelencia al agua en los suelos bajo cobertura de *Quercus humboldtii*, *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*, la cual incrementó al aumentar el secado de las muestras. Con la cobertura de Ciprés se presentó la mayor persistencia.

Una característica sobresaliente de la hidrofobicidad del suelo es su alta variabilidad, tanto aleatoria, como espacial y temporal. Este comportamiento dificulta su detección y su manejo y, específicamente la temporal, hace que muchas veces pase desapercibida ya que en épocas húmedas, como ya se mencionó, puede que no se manifieste en condiciones de campo (Jaramillo, 2011).

Dekker (1998) y Ritsema (1998), en estudios de repelencia al agua realizados en dunas de la costa de Holanda, encontraron una alta variabilidad en ella con muestras tomadas a cortas distancias y observaron una estrecha relación de la repelencia al agua con el contenido de materia orgánica, la densidad aparente y la conductividad hidráulica.

En estudios realizados en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas se ha detectado un alto grado de repelencia al agua bajo cobertura forestal natural y bajo

plantaciones de pino, así como una alta variabilidad espacial de rango corto en ella; se ha confirmado, además, la distribución en parches del fenómeno, observada por Jaramillo (1992), y se ha detectado la formación de vías de flujo preferencial y la presencia de anisotropía en su distribución (Jaramillo, 2003, 2011; Vanegas, 2003).

En suelos con condiciones similares a las de éste estudio, y con cobertura de *Pinus patula*, Jaramillo (2003) encontró que tanto la repelencia al agua como el contenido de humedad, mostraron una fuerte variabilidad espacial de rango corto y una aparente anisotropía en su distribución.

Con este trabajo se pretende conocer el comportamiento de la severidad de la repelencia al agua en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula* y natural, expresada como % de la solución de etanol (PE) que penetre en el suelo, secado a varias temperaturas, en 5 segundos o menos.

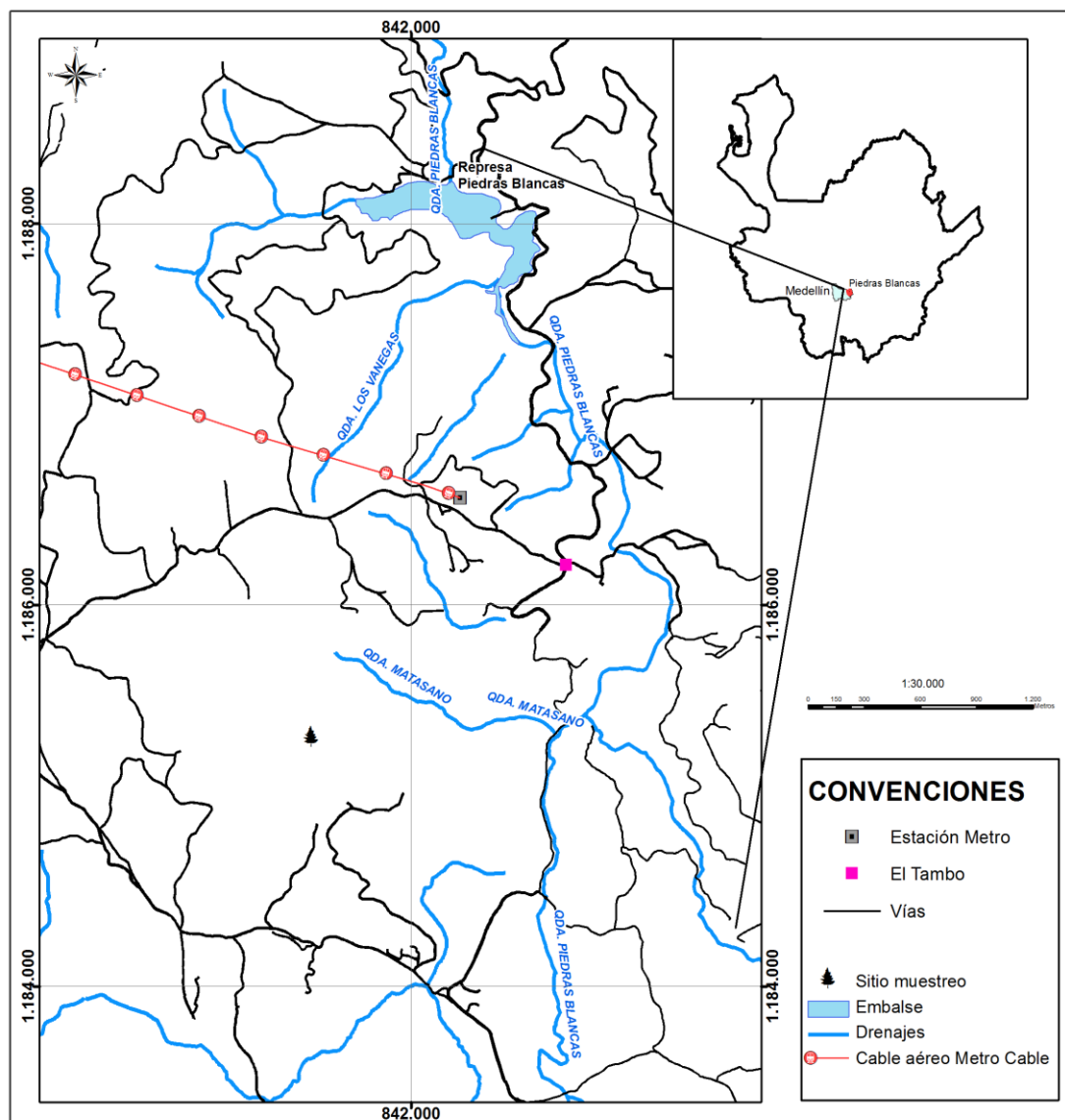
1.2 Materiales y métodos

1.2.1 Caracterización del sitio experimental

La cuenca hidrográfica alta de la quebrada Piedras Blancas se encuentra localizada a 17 km al oriente de la ciudad de Medellín, entre las coordenadas planas 1'180000 y 1'188990 de latitud norte y 840000 y 846000 de longitud oeste (Figura 1- 2). Su área se estima en 2911 ha y altitudinalmente está ubicada entre los 2340 y los 2680 msnm. Presenta una precipitación promedia anual de 1815 mm, con distribución bimodal, y una temperatura media anual de 14.7 °C (Jaramillo, 1989). Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge (Holdridge, 1987), la cuenca está ubicada en la zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh – MB)

En la cuenca se presentan anfíbolitas y serpentinitas como los materiales litológicos de mayor cobertura en ella; además, hay depósitos aluviales y de vertiente de edad cuaternaria. Todos los materiales se encuentran recubiertos con ceniza volcánica, siendo ésta el material parental de los suelos en toda la cuenca (Jaramillo, 1989).

Figura 1- 2 Mapa general de la cuenca alta de la Quebrada Piedras Blancas y localización del lote experimental.



Los suelos de mayor importancia en la zona han sido clasificados como Acrudoxic Fulvudand, y se caracterizan por ser ácidos, bajos en bases, tener alto contenido de materia orgánica y muy bajo nivel de fertilidad (Jaramillo *et al.*, 2006).

La mayor parte, de la cuenca se encuentra bajo cobertura de *Pinus patula*, *Pinus elliottii*, *Cupressus lusitanica*, *Eucalyptus* sp. y de rastrojos altos, en los que predominan árboles como *Ilex danielis*, *Palicourea angustifolia*, *Myrcia* sp, *Schefflera uribei*, *Befaria aestuans*,

Miconia lehmannii, *Vaccinium meridionale*, *Clethra fagifolia*, *Vismia guianensis*, *Persea chrysophylla*, *Clusia decuoides* y *Tibouchina lepidota*.

El lote experimental está bajo una plantación de *Pinus patula* de más de 30 años conocida con el nombre La Chavarra, y se encuentra ubicado en las coordenadas planas 1°18'53.11" de latitud norte y 84°14'66" de longitud oeste (Figura 1- 2). Se caracteriza por tener una pendiente promedio del 10 %, una capa de acículas de 8.1 cm de espesor promedio y una distancia de siembra de aproximadamente 3 m (Figura 1-3).

Figura 1-3 Aspecto general del lote La Chavarra.



1.2.2 Muestreo

Con el fin de tener una amplia representación de todos los valores de severidad de la repelencia al agua, se hizo un pre-experimento que permitió conocer la distribución de esta propiedad en el lote experimental. Dicho pre-experimento consistió en evaluar la

severidad utilizando el método del porcentaje de la solución acuosa de alcohol etílico (PE) que penetró en el suelo en 5 segundos, tiempo de base propuesto por Jaramillo (2001). Se hizo un muestreo sistemático en una malla regular con dos densidades, en cuadrícula, una de 5 x 5 m y otra de 1 x 1 m. (Figura 1- 4) teniendo en cuenta que Jaramillo (1992) demostró que la repelencia al agua en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas se distribuye en parches pequeños.

Figura 1- 4 Cuadrícula de muestreo.



Con base en los resultados del pre-experimento se seleccionaron 22 sitios en los que se tomaron sendas muestras de suelo en la plantación de pino que representaron todo el rango de severidad de la repelencia al agua que se ha observado en la cuenca (Jaramillo, 1992).

Para tener una base de comparación se tomaron al azar 3 muestras de los mismos suelos en un lote con cobertura natural de la cuenca y 4 muestras más en suelos con propiedades vérticas procedentes del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana, con características físico-químicas fuertemente contrastantes con los suelos de la cuenca.

En cada sitio de muestreo seleccionado se tomó una muestra de un kilogramo de la parte superior (10 cm) del primer horizonte mineral del suelo, con la ayuda de un barreno. Una vez tomadas se empacaron inmediatamente en bolsas plásticas con cierre hermético, con el fin de evitar la pérdida de humedad, y se llevaron al laboratorio de suelos de la Universidad Nacional de Colombia, donde se procesaron. Cada muestra fue secada al aire y pasada por un tamiz de 2 mm de abertura, homogenizada y fraccionada en 4 porciones para diferentes análisis: una para fertilidad y propiedades ándicas, otra para caracterizar la materia orgánica, otra para la caracterización de los compuestos orgánicos y la última para la caracterización de la actividad microbiológica .

1.2.3 Procedimiento

Para evaluar la severidad de la repelencia al agua se empleó el método del porcentaje de la solución acuosa de alcohol etílico que penetró en el suelo en 5 segundos o menos (PE). Para hacer esta determinación se prepararon soluciones de etanol con concentraciones de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 % y, en adelante, soluciones con incrementos de 2 % de etanol hasta llegar a una concentración máxima de 36 %, con base en volumen (Dekker y Ritsema, 1994).

Una vez tomadas las muestras de suelo se llevaron al laboratorio, donde se procedió a secarlas al aire y tamizarlas a 2 mm para hacer la primera determinación de la severidad de la repelencia al agua (severidad en muestras secas al aire: PEa). Se hicieron luego cuatro determinaciones más en diferentes condiciones de secado al horno de las muestras: secadas a temperaturas de 30, 50, 75 y 105°C (PE30, PE50, PE75 y PE105). Todas las determinaciones se realizaron sobre la misma muestra.

Sobre cada una de las muestras se aplicaron gotas de solución de etanol con concentraciones variadas y replicadas 3 veces, utilizando goteros. A cada gota aplicada se le midió el tiempo que gastaba en penetrar la muestra, registrando el valor de la primera concentración (la más baja) de la solución cuyas gotas penetraron en 5 segundos o menos.

1.3 Resultados y discusión

En la Tabla 1- 3, se presentan los estadísticos que caracterizaron la severidad de la repelencia al agua de las muestras estudiadas: media, mediana, moda, desviación estándar, coeficiente de variación, valor mínimo y valor máximo.

Los resultados de los análisis básicos se presentan sólo para las muestras correspondientes a la cobertura de *Pinus patula* y cobertura natural en la cuenca, debido a que las muestras de suelos tomadas en el Carmen de Bolívar, bajo diferentes coberturas (plantación de teca, rastrojo alto y pasto), no presentaron hidrofobicidad en ninguna de las temperaturas de secado.

Tabla 1- 3 Estadísticos básicos de la severidad de la repelencia al agua en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, sometidos a diferente temperatura de secado.

Suelos bajo plantación de <i>Pinus patula</i> en la cuenca (n=22)					
Estadísticos *	PEa	PE30	PE50	PE 75	PE105
Promedio	9.55 c**	9.95 c	10.27 c	15.55 b	21.59 a
Mediana	10.00	10.50	12.00	16.00	22.00
Moda	10.00	12.00	12.00	22.00	18.00
DE	5.18	5.26	5.23	4.66	4.17
CV	54.27	54.84	50.91	29.96	19.32
Máximo	20	20	20	22	28
Mínimo	1	1	1	6	12
Suelos bajo cobertura natural en la cuenca (n=3)					
Promedio	4	4	4	4	4,7
Mediana	1	1	1	1	2
Moda	1	1	1	1	-
DE	5.20	5.20	5.20	5.20	5.51
CV	129.9	129.9	129.9	129.9	129.9
Máximo	10	10	10	10	11
Mínimo	1	1	1	1	1

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación.

** Valores con igual letra en la fila no presentan diferencia significativa al 95%.

En la Tabla 1- 3 se observa que a medida que se incrementa la temperatura de secado de las muestras, aumenta la severidad de la repelencia al agua. Se presentaron diferencias estadísticamente significativas (al 95 %) entre los promedios de la severidad a la repelencia de las muestras secadas a 75 °C y 105 °C, y entre éstas y las demás. Este efecto ha sido relacionado con varias posibilidades: cambios en la polaridad de los

compuestos hidrofóbicos y/o reorganización de sus estructuras; reordenamiento de los compuestos orgánicos anfifílicos, exponiendo los radicales hidrofóbicos; diferentes condiciones de humedad iniciales de las muestras; deshidratación de algunos compuestos al ir aumentando la temperatura de secado; tipo de materia orgánica del suelo (Jaramillo, 2003).

El incremento en la severidad de la repelencia al agua, al aumentar la temperatura de secado del suelo, puede ser consecuencia de una deshidratación creciente de las moléculas orgánicas anfifílicas, y su posterior orientación, por efecto de las fuerzas intermoleculares generadas entre la parte polar de las moléculas y las superficies de los coloides del suelo.

La deshidratación de las moléculas anfifílicas, por efecto de la temperatura de secado, puede aumentar la cantidad de uniones entre las terminales no polares de las moléculas orgánicas hidrofóbicas, mediante el mecanismo de las interacciones intermoleculares hidrofóbicas que, cuando se presentan en cantidades altas, pueden originar los parches hidrofóbicos observados en los suelos de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas.

Los valores de los coeficientes de variación fueron relativamente altos en todas las determinaciones, confirmando la alta variabilidad que presenta el fenómeno de la hidrofobicidad en el suelo, observado en varios estudios (Jaramillo, 2003, 2011; Vanegas, 2003). Nótese que en la cuenca, en ninguna de las temperaturas de secado se presentaron muestras correspondientes a la clase 1 de la Tabla 1- 2, en contraste con las muestras procedentes del Carmen de Bolívar, donde todas pertenecieron a la clase 1 (valor mínimo), en todas las condiciones de secado.

Teniendo en cuenta el sistema de clasificación de la severidad de la repelencia al agua expuesto en la Tabla 1- 2, se puede observar que las muestras analizadas bajo cobertura de *Pinus patula* presentaron PEa, PE30 y PE50 promedia entre ligera y fuerte y PE75 y PE105 entre severa y extrema (Tabla 1- 3).

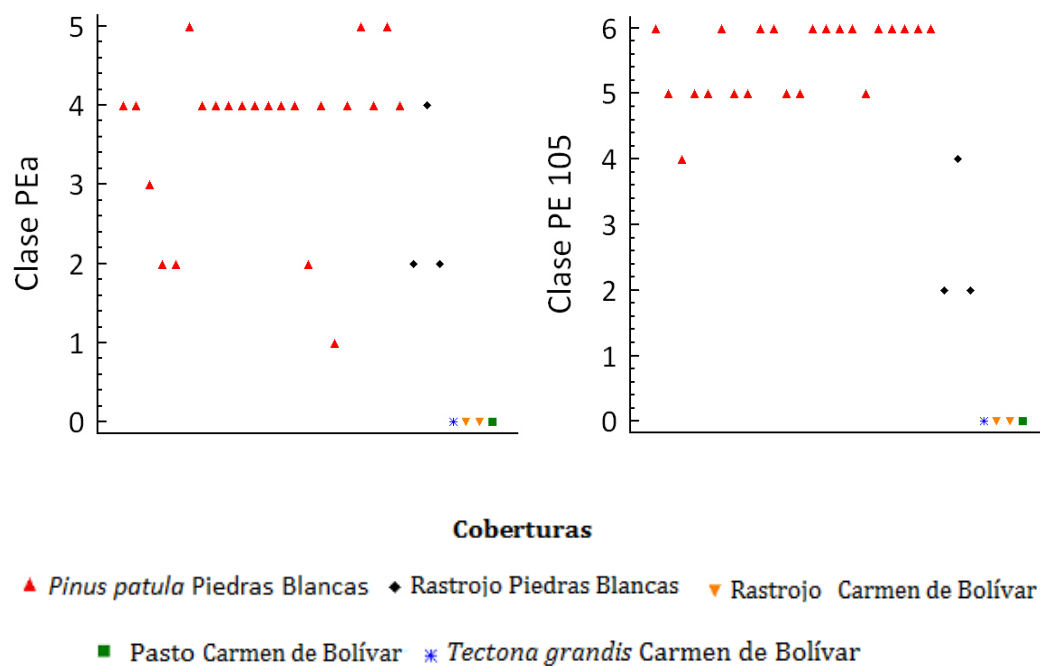
Bajo cobertura de *Pinus patula* se presentaron los valores más altos de severidad de la repelencia al agua, lo que coincide con lo encontrado por Vanegas (2003) en un estudio

realizado en la misma cuenca, donde los valores de WDPT fueron, en general, mayores en suelos bajo cobertura de *Pinus patula* que bajo cobertura natural.

Por otro lado, las muestras correspondientes a la cobertura natural en Piedras Blancas presentaron, en todas las condiciones de secado, una severidad al agua que pasó de ligera a fuerte, donde la clase más alta para esta cobertura fue la 4 (Figura 1- 5).

En la Figura 1- 5 se presenta la distribución de las clases de severidad de los suelos con las muestras secadas al aire (PEa) y a 105 °C (PE105), donde se observa que hay varias muestras que no presentaron repelencia al agua en ninguna de las temperaturas de secado: ellas fueron las de los suelos vérticos del Carmen de Bolívar, región en la cual no se ha reportado hidrofobicidad en los suelos. Además, Jaramillo *et al.* (1997) comprobaron que en este tipo de suelos no se generó hidrofobicidad al adicionar extractos obtenidos de Andisoles repelentes al agua, probablemente debido al tipo y contenido de arcillas que tienen estos suelos.

Figura 1- 5 Distribución de las clases de severidad de la repelencia al agua en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana sometidos a dos temperaturas de secado (al aire y a 105 °C).



En la Figura 1- 5 se observa que la severidad de la repelencia al agua es menor en las muestras secadas al aire, mientras que en las secadas a 105 °C se encuentra el mayor número de muestras con clase 6, confirmándose que el fenómeno de la hidrofobicidad tiende a incrementarse a medida que aumenta la temperatura de secado del suelo (Dekker, 1998; Jaramillo, 2003; Vanegas, 2003).

Al hacer un análisis de correlación de la severidad de la repelencia al agua en las diferentes condiciones de secado para todas las muestras (22 en Andisoles bajo cobertura de pino, 3 bajo cobertura natural en el mismo suelo y 4 muestras más en suelos con propiedades vérticas), se halló una alta correlación entre las variables estudiadas, la cual fue estadísticamente significativa, como se muestra en la Tabla 1- 4.

Tabla 1- 4 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua, en diferentes condiciones de secado, en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana (n = 29).

	PEa	PE30	PE50	PE75
PE30	0.9902			
PE50	0.8422	0.8563		
PE75	0.8537	0.8698	0.8352	
PE105	0.7802	0.7951	0.7781	0.9716

Los mayores coeficientes de correlación se presentaron entre PEa – PE30 y PE75 – PE105, comportamiento que puede estar relacionado con un contenido de humedad muy similar en el suelo en las condiciones en que se hizo la determinación del PE correspondiente.

Los altos valores obtenidos en los coeficientes de correlación sugieren que el PEa y el PE105 caracterizan completamente la severidad de la repelencia al agua real y extrema, respectivamente.

1.4 Conclusiones

- En todos los Andisoles se presentó hidrofobicidad, en todas las condiciones de secado de las muestras. En ninguno de los suelos con propiedades vérticas hubo repelencia al agua, en ninguna condición de secado. Además, la mayor severidad se presentó en suelos bajo cobertura de *Pinus patula*, en todos los casos.
- A medida que se incrementó la temperatura de secado, se incrementó la severidad de la repelencia al agua, y dicho incremento fue mayor en los suelos ubicados bajo plantaciones de *Pinus patula*.
- Para todas las muestras correspondientes a Andisoles bajo cobertura natural y de *Pinus patula*, la hidrofobicidad potencial fue mayor que la hidrofobicidad real.
- La severidad de la repelencia al agua en muestras secadas al aire y a 105 °C representan bien la severidad real, así como la potencial extrema del suelo, respectivamente.

1.5 Bibliografía

- Caballero, B. 2005. Variabilidad espacial de la hidrofobicidad en Andisoles bajo tres coberturas vegetales. Trabajo de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 40 p.
- DeBano, L. F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. Gen. Tech. Rep. PSW-46, Pacific Southwest Forest and Range. Experiment Station, 21p.
- DeBano, L. F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. J. Hydrol. 231 – 232: 4 - 32.
- Dekker, L. W. 1998. Moisture variability resulting from water repellency in dutch soils. Doctoral Thesis, Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 240 p.
- Dekker, L. W. and C. J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potential and actual water repellency. Water Resour. Res. 30 (9): 2507 – 2517.
- Dekker, L. W. and C. J. Ritsema. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. J. Hydrol. 231-232: 4-32.

- Doerr, S. H.; R. A. Shakesby and R. P. D. Walsh. 2000. Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. *Earth Sci. Rev.* 51: 33-65.
- Holdridge, R. L. 1987. *Ecología Basada en Zonas de Vida*. Costa Rica: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 216 p.
- Jaramillo, J. D. F. 1989. Reconocimiento de suelos con fines recreacionales y agropecuarios en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas. Empresas Públicas de Medellín. Medellín. 67 p.
- Jaramillo, J. D. F. 1992. Relación entre la acumulación de acículas (Litter) de *Pinus patula* y la hidrofobicidad en algunos Andisoles de Antioquia. Tesis Magíster en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 95 p.
- Jaramillo, J. D. F. 1996. Efecto de la extracción con mezclas de solventes en Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Revista del ICNE* 6 (1): 65 – 78.
- Jaramillo, J. D. F. 2001. Evaluación del método MED para medir el grado de repelencia al agua de Andisoles del oriente antioqueño. *Revista del ICNE* 7 (1): 51-62.
- Jaramillo, J. D. F. 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 36 p.
- Jaramillo, J. D. F. 2005. Humedad crítica y repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 58(2):2893-2906.
- Jaramillo, J. D. F. 2011. Repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 218 p.
- Jaramillo, J. D. F. y F. E. Herrón. 1991. Evaluación de la repelencia al agua de algunos Andisoles de Antioquia bajo cobertura de *Pinus patula*. *Acta Agronómica*. 41: 1 – 4.
- Jaramillo, J. D. F.; M. T. Flórez y L. N. Parra. 2006. Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 36 (1): 61-71.
- Jaramillo, J. D. F.; C. Ortiz.; C. A. Peláez.; R. D. Zapata y C. Uribe. 1997. Extracción de sustancias hidrofóbicas de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño, con solventes polares. *Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín* 50 (2): 19-43
- Jaramillo, J. D. F.; L. W. Dekker; C. J. Ritsema and J. M. H. Hendrickx. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *J. Hydrol.* 231-232: 105-111.

- King, P. M. 1981. Comparison of methods for measuring severity of water repellence of sandy soils and assessment of some factors that affect its measurement. *Aust. J. Soil. Res.* 19:275 – 285.
- Ritsema, C. J. 1998. Flow and transport in water repellent sandy soil. Doctoral Thesis. Wageningen Agricultural University. The Netherlands. 215 p.
- Roy, J. L. and W. B. McGill. 2002. Assessing soil water repellency using the molarity of ethanol droplet (MED) test. *Soil Sci.* 167: 8397.8397.
- Roy, J. L. and W. B. McGill. 1998. Characterization of disaggregated nonwetttable surface soil found at old crude oil spill sites. *Can. J. Soil Sci.* 78: 331 – 334.
- Vanegas, V. H. A. 2003. Efecto de la temperatura de secado de Andisoles bajo dos coberturas vegetales sobre el grado de hidrofobicidad que desarrollan. Trabajo de Grado Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 61 p.
- Wallis, M. G. and D. J. Horne. 1992. Soil water repellency. *Advances Soil Sci.* 20: 91-146.
- Watson, C. L. and J. Letey. 1970. Indices for characterizing soil water repellency based upon contact angle – surface tension relationships. *Soil Sci. Soc. Am. P 34*: 841 - 844.

2. Fertilidad y propiedades ándicas de los suelos

2.1 Introducción

Los Andisoles son suelos que se desarrollan, predominantemente, a partir de materiales provenientes de erupciones volcánicas (ceniza, pómez, lava, etc.) y/o de materiales volcanoclásticos en los que la fracción coloidal está dominada por minerales de bajo grado de ordenamiento o por complejos Al-humus (Soil Survey Staff, SSS, 1999).

Los materiales representativos de estos suelos le dan a los mismos unas características únicas y distintivas, llamadas propiedades ándicas, las cuales se manifiestan en una baja densidad aparente, una alta carga variable y una alta capacidad de retención de fosfatos y de humedad (Arnalds y Stahr, 2004).

En el sistema de clasificación taxonómica de suelos del USDA (SSS, 1999, 2010) se han establecido como propiedades diagnósticas para el orden, en la tierra fina del Andisol con bajo contenido de vidrio volcánico, como sucede en los Andisoles del Oriente antioqueño (Jaramillo *et al.*, 2006), las siguientes:

- Densidad aparente con humedad retenida a 33 kPa menor de 0.9 Mg m^{-3}
- Retención de fosfatos mayor o igual a 85 %
- Contenido de $(\text{Al}_o + 0,5 \text{ Fe}_o)$ (Al y Fe extractables con oxalato ácido de amonio) mayor o igual a 2 %.

Para clasificar los Andisoles en las otras categorías altas del sistema USDA, es decir, hasta el subgrupo, hay que tener en cuenta otras propiedades diagnósticas relacionadas con las propiedades ándicas como el contenido de Al extractable con KCl 1N, la CIC efectiva (CICE), el contenido de vidrio volcánico, el contenido de materia orgánica (MO), la retención de humedad y el índice melánico (IM) (SSS, 1999, 2010).

Dahlgren *et al.* (1993) apuntan que en los suelos con influencia de materiales volcánicos, se pueden presentar dos tipos de complejo coloidal altamente reactivo: uno formado por partículas inorgánicas de tamaño arcilla con altos contenidos de Al y de Fe activos, provenientes de la alteración de los materiales volcánicos y que son la alofana, la imogolita y la ferrihidrita, y el otro, formado por complejos humus-Al/Fe.

Según González (2011), los Andisoles, en general, son suelos recientes que se presentan en clima húmedo y muy húmedo, poseen una fertilidad natural baja: son suelos muy ácidos, con alto déficit de bases, abundante aluminio intercambiable y alta retención de fosfatos. Físicamente poseen excelentes propiedades: alta retención de humedad (a 1500 kPa algunos pueden retener más del 70 % de humedad), porosidad alta, densidad aparente baja y con predominio de microporos.

Obando *et al.* (2006), al estudiar la variabilidad espacial de las propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands ubicado en la cordillera central colombiana, encontró que el pH osciló entre extremadamente ácido a ligeramente ácido y los contenidos de bases intercambiables y de P, así como la CIC variaron entre bajo y alto.

Jaramillo (1995) y Abril y Ortiz (1996) caracterizaron químicamente Andisoles del oriente antioqueño y encontraron como principales problemas, asociados con la baja fertilidad natural de estos suelos, el pH fuertemente ácido, los bajos contenidos de bases y de fósforo y los desbalances entre las bases.

Jaramillo (1989) realizó un levantamiento semidetallado de los suelos de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas y encontró que los dominantes, en la mayoría de los paisajes, se habían desarrollado a partir de depósitos de ceniza volcánica y correspondían, según el sistema de clasificación norteamericano vigente en esa época (SSS, 1975), al subgrupo Typic Dystrandepts, presentándose unas pequeñas inclusiones de Lithic Dystrandepts. Estimó, además, que los suelos predominantes en la cuenca, según las propuestas de reforma de la taxonomía que se discutían en el momento (ICOMAND, 1988), podrían pertenecer a los grandes grupos Melanudands, Fulvudands y Hapludands.

Los Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas (Figura 2- 1) son profundos, bien o moderadamente bien drenados en las laderas y con drenaje imperfecto en las depresiones, tienen texturas medias y son bien estructurados, presentan altos contenidos de materia orgánica y de aluminio intercambiable, bajos en bases y en fósforo disponible y son de bajo nivel de fertilidad natural (Jaramillo *et al.*, 2006).

Figura 2- 1 Andisol típico de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas. Foto facilitada por Jaramillo, D. F.



En los Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas se ha detectado la presencia de repelencia al agua en el horizonte superficial, bajo diferentes coberturas vegetales (Jaramillo, 1992; Vanegas, 2003; Caballero, 2005).

Los materiales repelentes al agua de los Andisoles descritos por Jaramillo (1992), se caracterizan por tener un aspecto polvoriento, suelto, con estructura migajosa muy fina a fina; se presentan muy secos con respecto al horizonte de suelo inmediatamente debajo de él, contienen gran cantidad de materia orgánica con diferentes grados de descomposición y se ubican inmediatamente debajo de la capa de materia orgánica acumulada sobre el suelo.

Castillo y Gómez (1995) evaluaron propiedades químicas en Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, obteniendo como resultado suelos con bajos contenidos de bases y de fósforo, fuertemente ácidos, considerados de baja fertilidad natural.

Jaramillo (1999), al comparar la fertilidad de Andisoles repelentes al agua con la de suelos humectables en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, no observó diferencias apreciables entre los dos grupos, aunque sin confirmar si esas diferencias eran estadísticamente significativas.

En este capítulo se pretende caracterizar la fertilidad y las propiedades ándicas de Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula* y de rastrojo natural, y establecer si existe una relación entre las variables anteriormente mencionadas y la severidad de la repelencia al agua.

2.2 Materiales y métodos

2.2.1 Caracterización del sitio experimental y muestreo

La caracterización del sitio experimental y del muestreo, se detalló en los numerales 1.2.1. y 1.2.2.

2.2.2 Procedimiento

En las submuestras seleccionadas para la caracterización de la fertilidad y de las propiedades ándicas de los suelos (numeral 1.2.2) se determinaron 15 propiedades químicas y una física relacionadas con su fertilidad y con su génesis. Las determinaciones hechas y los métodos utilizados para hacerlas, se presentan en la Tabla 2- 1.

Tabla 2- 1 Determinaciones y métodos de evaluación de las propiedades químicas y físicas estudiadas (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC, 2006).

Propiedades	Unidades	Método
Física		
Densidad aparente (Da)	Mg m ⁻³	Cilindro biselado
Químicas		
pH	-	Potenciométrico en agua 1:1 v:v
Contenido de materia orgánica (MO)	%	Walkley-Black
Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)	cmol(+) kg ⁻¹ suelo	Suma de bases más acidez intercambiable
Contenidos intercambiables de Ca, Mg, K y Al	cmol(+) kg ⁻¹ suelo	Ca, Mg y K extraídos con acetato de amonio 1M y neutro. Al extraído con KCl 1N
Contenidos disponibles de P y Fe	mg kg ⁻¹ suelo	P por Bray II. Fe por Olsen modificado.
Propiedades químicas relacionadas con la génesis		
pH en NaF	-	Potenciométrico 1:50 p:v
Contenidos de Al y Fe extractables con oxalato ácido de amonio (Alo y Feo)	%	Blakemore
Contenidos de Al y Fe extractables con pirofosfato de sodio (Alp y Fep)	%	Bascomb
Fijación de fosfatos (FF)	%	Blakemore
Índice melánico (IM)	-	Honna <i>et al.</i>

2.3 Resultados y discusión

2.3.1 Propiedades relacionadas con fertilidad

En las Tablas 2-2, 2-3 y 2-4 se presentan algunos de los estadísticos básicos, y el valor p de la prueba de normalidad de Shapiro – Wilks, de las propiedades que caracterizaron la fertilidad de los Andisoles repelentes al agua de la parte central de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, y de algunos suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar.

Los cuartiles obtenidos indican que la mayoría de los Andisoles repelentes al agua, bajo cobertura de *Pinus patula*, presentan una reacción fuertemente a extremadamente ácida, contenido alto de materia orgánica y de hierro y bajo de bases intercambiables (Ca, Mg, K) y de fósforo disponible (Tabla 2- 2). Condiciones similares presentaron los valores promedios encontrados en estos mismos suelos bajo cobertura natural (Tabla 2- 3).

Los contenidos de K, bajo cobertura de *Pinus patula*, y de Ca, P y Fe bajo cobertura natural fueron las propiedades más variables, con coeficientes de variación de 195.37, 111.58, 114.64, y 92.39 %, respectivamente, mientras que el pH fue la menos variable, con coeficientes de sólo 5.43 y 6.61 %. Este mismo comportamiento fue observado en Andisoles humectables por Jaramillo (1995) en el oriente antioqueño, Valencia (1992) y Quevedo (1984) en la zona cafetera de colombiana, y por Gamboa (1972) en Nariño.

En los Andisoles que estuvieron bajo cobertura de *Pinus patula* la distribución de probabilidad fue normal sólo para el Al y Fe, mientras que en los que estuvieron bajo cobertura natural todas las propiedades, excepto Mg, tuvieron distribución normal. Las demás propiedades químicas estudiadas, bajo cobertura de pino, no presentaron normalidad en la distribución (Tabla 2- 2 y Tabla 2- 3).

Tabla 2- 2 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la fertilidad en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* (n = 22).

Variables **	Promedio	Mediana	DE	CV (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Sesgo	Valor p de Saphiro – Wilks
pH	4.92	5.0	0.22	4.56	4.30	5.20	4.8	5.1	-2.30	0.010
MO	23.83	25	6.40	26.87	3.10	37.90	21.2	26.8	-2.45	0.000
Al	3.53	3.55	1.97	55.84	0.50	9.40	2.0	4.4	2.05	0.120
Ca	0.02	0.02	0.01	35.86	0.01	0.04	0.02	0.03	1.40	0.000
Mg	0.07	0.07	0.01	20.83	0.03	0.09	0.06	0.08	-1.64	0.040
K	0.20	0.10	0.39	195.37	0.06	1.92	0.08	0.13	8.53	0.000
P	2.64	2.0	1.50	56.80	1.00	7.00	2.0	3.0	3.65	0.000
Fe	166.64	153.5	58.51	35.11	67.00	292.00	127.0	202	1.00	0.540

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. Sesgo: Sesgo estandarizado.

**MO: Contenido de materia orgánica.

Tabla 2- 3 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la fertilidad en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura natural (n = 3).

Variables**	Promedio	DE	CV (%)	Mínimo	Máximo	Valor p de Saphiro – Wilks
pH	4.60	0.25	5.43	4.40	4.09	0.780
MO	21.90	6.61	30.19	14.70	27.70	0.650
Al	3.87	0.76	19.75	3.20	4.70	0.640
Ca	0.70	0.78	111.58	0.20	1.60	0.120
Mg	0.20	0.17	86.60	0.10	0.40	0.000
K	0.27	0.19	68.67	0.16	0.49	0.050
P	10.33	11.85	114.64	3.00	24.00	0.080
Fe	409.67	378.49	92.39	133.00	841.00	0.310

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación.

**MO: Contenido de materia orgánica

Una muestra tomada bajo cobertura de pino presentó un comportamiento anómalo, con valores extremadamente altos de Al ($9.4 \text{ cmol (+) kg}^{-1}$) y de materia orgánica (37.9 %) y un valor muy bajo de pH (4.3). Además, esta muestra, no cumplió con las propiedades exigidas para ser un Andisol, a pesar de estar rodeado de ellos. Por lo anterior, dicha muestra fue eliminada para los análisis de las propiedades ándicas y para el análisis de correlación entre la severidad de la repelencia al agua, la fertilidad natural y las propiedades ándicas y afines, en diferentes condiciones de secado.

En los suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar se obtuvieron resultados, en las propiedades químicas analizadas, completamente diferentes a los encontrados para los Andisoles. Según los valores promedios (Tabla 2- 4), los suelos vérticos presentaron un pH neutro, contenido alto de materia orgánica, bases (Ca, Mg, K) y fósforo disponible.

Tabla 2- 4 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la fertilidad en algunos suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana, bajo diferentes coberturas (n = 4).

Variables**	Promedio	DE	CV (%)	Mínimo	Máximo	Valor p de Saphiro – Wilks
pH	7.25	0.48	6.61	6.7	7.7	0.550
MO	4.28	1.92	44.97	2.8	7.1	0.230
Ca	22.23	4.11	18.48	17.8	27.2	0.880
Mg	8.18	3.09	37.83	6	12.7	0.230
K	2.75	2.62	95.22	1.29	6.68	0.010
P	31	17.68	57.68	8	51	0.760
Fe	19.75	14.41	72.95	9	41	0.180

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación.

**MO: Contenido de materia orgánica

Para los suelos con propiedades vérticas, los contenidos de K y de Fe fueron las propiedades más variables, con coeficientes de variación de 95.22 % y 72.95 %, respectivamente, mientras que, como en los Andisoles, el pH fue el menos variable, con un coeficiente de 6.61 %. La distribución de los valores de las variables evaluadas, a excepción del K, fue normal (Tabla 2- 4).

2.3.2 Interpretación de la fertilidad para las muestras de Andisoles

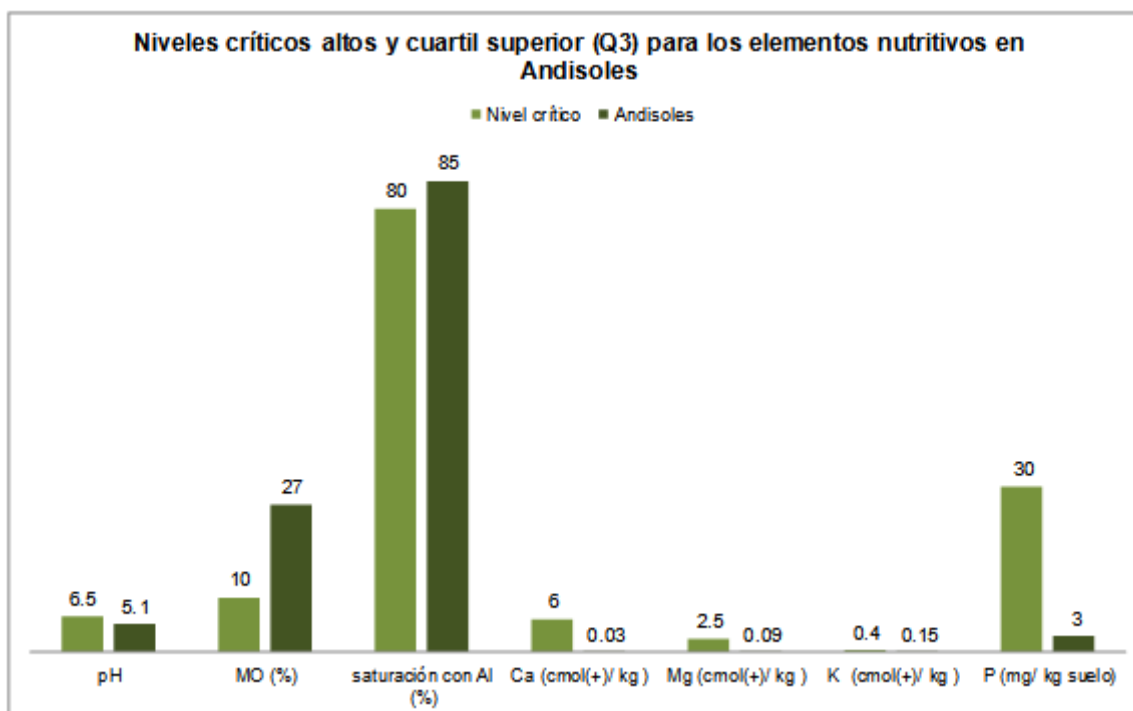
Para la interpretación de los niveles de fertilidad en los Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula* y cobertura natural, así como para los suelos con propiedades vérticas bajo diferentes coberturas, se tuvieron como base los niveles críticos propuestos por el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 1992).

Cuando se habla de la fertilidad natural de un suelo, se está haciendo referencia a la posibilidad que tiene el mismo de garantizar unas condiciones adecuadas para el desarrollo de la planta, sin que se haya hecho ninguna intervención antrópica en él. En un sentido netamente químico, la fertilidad se restringe a establecer la disponibilidad de nutrientes para la planta.

Una de las propiedades químicas del suelo que mayor control tiene sobre la disponibilidad de los nutrientes es su pH. Guerrero (1991), sostiene que, agronómicamente, la mayoría de elementos esenciales para las plantas tienen su máxima disponibilidad a pHs entre 5.5 y 6.7 y que probablemente el pH óptimo está entre 6.2 y 6.5. Herrón (2001), citado por Jaramillo (2011b), aclara que en Andisoles este rango está entre 5.5 y 6.0.

Al comparar los valores promedios de las variables pH, Ca, Mg, K y P de los Andisoles estudiados, con los niveles críticos propuestos por el ICA (1992) para calificar el contenido de nutrientes como alto y el pH como adecuado (Figura 2.2), todas se encuentran por debajo del nivel óptimo.

Figura 2- 2 Valores promedios de algunas propiedades químicas relacionadas con la fertilidad, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, teniendo como referente los niveles críticos altos propuestos por el ICA (1992).



Los suelos presentaron, en promedio, una saturación con aluminio mayor al 80%. Sin embargo, no se manifiesta toxicidad con este elemento debido a que, como demostró Gartner (1994), el KCl 1M es capaz de extraer Al unido a la materia orgánica, el cual no está en forma tóxica para las plantas.

Aunque el contenido de materia orgánica se encuentra por encima del nivel crítico (mayor de 10%), no hay garantía de que se posea un nivel adecuado de este coloide debido a que en estos suelos se forman complejos alofano-humus y Al-humus muy estables, lo que hace que buena parte de ella sea difícil de mineralizar y, por tanto, que poco participe en los procesos de nutrición (Jaramillo, 1999).

Los bajos contenidos de bases (Ca, Mg y K) y de P, así como la alta acidez y los altos contenidos de materia orgánica no mineralizable, convierten estos Andisoles en unos suelos de muy bajo nivel de fertilidad.

2.3.3 Propiedades ándicas y relacionadas

En este aparte se tratarán las propiedades relacionadas con la génesis de los Andisoles estudiados. No se incluyen los suelos vérticos puesto que su mineralogía es completamente diferente a la de aquellos (Tabla 2- 5)

Cabe destacar la alta variabilidad que presentaron la mayoría de las propiedades estudiadas, la cual se refleja en los altos coeficientes de variación. Además, la distribución de los valores de las propiedades no fue normal para la densidad aparente, el pH en NaF, FF y Fep.

Estos suelos, según el Q1, cumplen con los requerimientos de fijación de fosfatos, densidad aparente y contenido de Alo y Feo, como para considerarlos con propiedades ándicas. Además, la mayoría de las muestras tiene un IM > 1.7 % que implica poca humificación (Honna *et al.*, 1987, citado por ICOMAND, 1988; Jaramillo 2011a).

Todas las muestras presentaron una relación $Alp/Alo > 0.5$ en las dos coberturas estudiadas. Esta relación, según Malagón *et al.* (1991) y Jaramillo *et al.* (2006), hace que se presente un efecto anti-alofánico en el horizonte A del suelo que contribuye a la alta acumulación de materia orgánica complejada con Al, evitando la formación de alófana.

2.4 Análisis de correlación

Debido a que los suelos con propiedades vérticas no presentan propiedades ándicas, para este análisis sólo se tuvieron en cuenta los Andisoles. En el análisis de correlación entre las propiedades ándicas, la fertilidad y la severidad de la repelencia al agua en las diferentes condiciones de secado (21 Andisoles bajo cobertura de pino y 3 bajo cobertura natural) se presentaron pocas correlaciones significativas estadísticamente al 95 % (resaltadas en negrilla en la Tabla 2- 6).

Los altos coeficientes de correlación entre todas las medidas de severidad de la repelencia al agua, en diferentes condiciones de secado, confirman la persistencia de éste fenómeno en los Andisoles estudiados y corroboran el efecto del secado en la manifestación de la hidrofobicidad, como lo observaron Jaramillo y Vanegas (2007) en Andisoles de la misma cuenca de la quebrada Piedras Blancas.

Las pocas correlaciones significativas que se presentaron con las propiedades relacionadas con la fertilidad son conocidas en suelos humectables y han sido encontradas también en Andisoles repelentes al agua (Jaramillo, 1999).

La correlación inversa entre la D_a y la severidad de la repelencia al agua puede estar mostrando el efecto que tiene la humedad sobre la D_a . Es conocido que la humedad del suelo afecta la determinación de la D_a en suelos que presentan arcillas expandibles (Jaramillo, 2011b) debido al cambio de volumen que ellas presentan con los diferentes estados de humedad. Algo similar puede estar pasando con los Andisoles, repelentes al agua o no, pues ellos, a pesar de no tener arcillas expandibles, sí poseen una alta capacidad de contracción al secarse (Castillo y Gómez, 1995; Abril y Ortiz, 1996).

Tabla 2- 5 Estadísticos* básicos de las propiedades ándicas y afines en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* y cobertura natural (n=24).

Variables**	Promedio	Mediana	DE	CV (%)	Mínimo	Máximo	Q1	Q3	Sesgo estandarizado	Valor p de Saphiro - Wilks
Da	0.39	0.37	0.10	27.06	0.23	0.71	0.31	0.44	2.67	0.040
IM	1.74	1.75	0.10	5.65	1.51	1.87	1.67	1.81	-1.33	0.222
pH NaF	10.74	10.94	0.59	5.50	8.99	11.37	10.61	11.17	-2.91	0.003
FF	98.01	98.78	1.79	1.82	94.58	99.71	97.05	99.40	-1.99	0.000
Alo	1.50	1.48	0.50	33.27	0.81	2.54	1.08	1.81	0.97	0.268
Feo	0.52	0.53	0.14	26.41	0.23	0.78	0.45	0.59	-0.60	0.681
Alp	1.98	1.96	0.54	27.45	1.04	3.34	1.62	2.21	1.22	0.626
Fep	0.37	0.31	0.23	61.94	0.14	1.03	0.24	0.42	3.91	0.000
Alp/Alo	1.41	1.35	0.53	37.29	0.59	3.00	1.10	1.67	1.90	0.122
Alo + 1/2 Feo	1.75	1.68	0.51	29.04	1.01	2.79	1.39	2.15	0.91	0.417

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Q1 y Q3: Cuartil inferior y superior, respectivamente.

** Da: Densidad aparente. IM: Índice melánico. FF: Fijación de fosfatos. Alo: Contenidos de Al extractables con oxalato ácido de amonio. Feo: Contenidos de Fe extractables con oxalato ácido de amonio. Alp: Contenidos de Al extractables con pirofosfato de sodio. Fep: Contenidos de Fe extractables con pirofosfato de sodio.

Tabla 2- 6 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua, la fertilidad natural y las propiedades ándicas y afines, en diferentes condiciones de secado, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* y natural (n = 24).

	PEa	PE 30	PE 50	PE75	PE 105	pH	MO	Al	Ca	Mg	K	P	Fe	IM	pH en NaF	FF	Alo	Feo	Alp	Fep	Alo+1/2Feo	Alp/Alo
PE 30	0.984																					
PE 50	0.733	0.758																				
PE75	0.777	0.800	0.731																			
PE 105	0.673	0.693	0.650	0.952																		
pH	0.040	0.026	-0.147	0.064	0.218																	
MO	0.075	0.097	0.202	0.249	0.211	-0.221																
Al	-0.002	0.044	0.307	0.141	0.029	-0.635	0.543															
Ca	-0.028	-0.045	-0.060	-0.271	-0.402	-0.365	0.143	0.201														
Mg	0.005	0.001	0.002	-0.193	-0.331	-0.391	0.214	0.310	0.978													
K	0.314	0.283	0.275	0.159	0.045	0.011	0.002	0.068	0.152	0.166												
P	0.079	0.056	0.059	-0.153	-0.270	-0.449	0.237	0.294	0.951	0.937	0.129											
Fe	0.039	0.034	0.029	-0.134	-0.265	-0.455	0.033	0.311	0.920	0.941	0.131	0.916										
IM	0.038	0.027	0.150	0.185	0.225	-0.066	0.380	0.064	-0.212	-0.209	0.206	-0.156	-0.239									
pH en NaF	-0.072	-0.044	-0.320	-0.044	0.060	0.532	-0.482	-0.628	-0.605	-0.616	-0.203	-0.635	-0.567	-0.312								
FF	-0.114	-0.118	-0.399	-0.156	-0.063	0.580	-0.470	-0.726	-0.357	-0.393	0.015	-0.398	-0.365	-0.329	0.892							
Alo	0.093	0.119	-0.096	0.090	0.248	0.368	-0.142	-0.385	-0.142	-0.155	-0.064	-0.025	-0.057	0.047	0.494	0.565						
Feo	0.171	0.168	0.118	0.226	0.150	-0.115	0.159	0.512	0.293	0.381	0.191	0.349	0.490	-0.124	-0.287	-0.247	0.105					
Alp	0.199	0.226	0.098	0.368	0.344	-0.010	0.048	-0.140	-0.357	-0.326	-0.109	-0.297	-0.300	-0.116	0.442	0.376	0.183	-0.240				
Fep	-0.361	-0.375	-0.437	-0.589	-0.761	-0.464	-0.187	0.177	0.516	0.486	0.073	0.387	0.470	-0.441	-0.151	-0.058	-0.413	0.191	-0.154			
Alo+1/2Feo	0.116	0.141	-0.077	0.120	0.264	0.344	-0.117	-0.308	-0.099	-0.101	-0.037	0.022	0.010	0.029	0.444	0.518	0.991	0.238	0.147	-0.378		
Alp/Alo	-0.048	-0.053	0.074	0.073	-0.024	-0.158	0.209	0.199	-0.163	-0.166	-0.071	-0.213	-0.276	-0.188	-0.055	-0.125	-0.617	-0.275	0.544	0.209	-0.640	
Da	-0.548	-0.536	-0.575	-0.737	-0.778	-0.058	-0.280	-0.235	0.372	0.307	-0.222	0.166	0.223	-0.341	0.206	0.242	-0.036	-0.056	-0.183	0.726	-0.042	-0.139

El pH en NaF presenta mayores correlaciones con los contenidos de nutrientes que el pH medido en agua, lo que parece resaltar la importancia de los materiales no cristalinos en el comportamiento químico de estos suelos.

El pH en NaF también correlacionó significativamente con los contenidos de Al y Fe activos del suelo, con el contenido de Al intercambiable y con la fijación de fosfatos, mostrándose como un buen indicador de dicha actividad química, aún en los Andisoles repelentes al agua, pues en Andisoles humectables del Japón ya habían notado estas relaciones Shoji *et al.* (1996).

2.5 Conclusiones

- Los Andisoles bajo cobertura natural y de *Pinus patula*, presentaron una baja fertilidad natural, la cual se caracterizó por una reacción fuertemente ácida, bajos contenidos de bases (Ca, Mg y K) y de fósforo disponible.
- Los suelos cumplieron con los niveles críticos en las propiedades ándicas bajo las coberturas natural y de *Pinus patula*. Tanto las propiedades ándicas como las relacionadas con la fertilidad tuvieron una alta variabilidad.
- No se encontró una correlación significativa entre la severidad de la repelencia al agua y las propiedades ándicas y aquellas relacionadas con la fertilidad de los Andisoles repelentes al agua de la parte central de la cuenca alta de la quebrada Piedras Blancas.

2.6 Bibliografía

- Abril, M. A. y B. A. Ortiz. 1996. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-químicas del horizonte A de Andisoles hidrofóbicos, bajo plantaciones de *Pinus patula*. Trabajo de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 75 p.
- Arnalds, O. and K. Stahr. 2004. Volcanic soil resources: occurrence, development, and properties. *Catena* 56 (1-3): 1-2.

- Caballero, B. 2005. Variabilidad espacial de la hidrofobicidad en Andisoles bajo tres coberturas vegetales. Trabajo de Grado Ingeniero Agrónomo. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 40 p.
- Castillo, A. y S. Gómez. 1995. Variabilidad espacial de algunas propiedades físico-químicas en el horizonte A hidrofóbico de Andisoles, bajo cobertura de *Pinus patula*. Trabajo de Grado Ingeniería Agronómica. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 116 p.
- Dahlgren, R., S. Shoji and M. Nanzoy. 1993. Mineralogical characteristics of volcanic ash soils. pp. 101-143. In: Shoji, S., M. Nanzoy and R. Dahlgren (eds.). Volcanic ash soils: genesis, properties and utilization. Developments in Soil Science 21. Elsevier Science Publishers, Amsterdam. 288 p.
- Gamboa, J. 1972. Variabilidad de los niveles nutricionales y fertilidad de los suelos andinos de Nariño. En: II panel sobre suelos volcánicos de América. IICA. – Universidad de Nariño. Pasto. 401 -419 p.
- Gartner, C. 1994. Determinación del aluminio tóxico en dos suelos ácidos. Tesis Química. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Antioquia. Medellín. 55 p.
- González, S. L. H. 2011. Geografía de suelos del departamento de Antioquia. Capítulo 3. En: Flora de Antioquia. Catálogo de las plantas vasculares. Volumen I. Edición. Callejas P. R. e Idárraga P. A. Universidad de Antioquia. 326 p.
- Guerrero, M. R. 1991. La acidez del suelo: la naturaleza, sus aplicaciones y su manejo. En: Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá. 141 – 163.
- ICOMAND. 1988. Circular letter No. 10. Leamy, M. L. *et al.* Editors. New Zealand. 80 p.
- Instituto Colombiano Agropecuario (ICA). 1992. Fertilización en diversos cultivos. 5ª. aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. ICA. Bogotá. 65 p.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). 2006. Métodos analíticos del laboratorio de suelos. 6a Edición. Bogotá, 648 p.
- Jaramillo, J. D. F. 1989. Reconocimiento de suelos con fines recreacionales y agropecuarios en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas. Empresas Públicas de Medellín. Medellín. 67 p.

- Jaramillo, J. D. F. 1992. Relación entre la acumulación de acículas (Litter) de *Pinus patula* y la hidrofobicidad en algunos Andisoles de Antioquia. Tesis Magíster en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 95 p.
- Jaramillo, J. D. F. 1995. Andisoles del oriente antioqueño: caracterización química y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35 p.
- Jaramillo, J. D. F. 1999. Características químicas de Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 52 (2): 657 – 673.
- Jaramillo, J. D. F. 2011a. Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un Andisol hidromórfico del Oriente antioqueño (Colombia). Rev. Acad. Colomb. Ciencs. 35 (134): 23 – 33.
- Jaramillo, J. D. F. 2011b. El suelo: Origen, propiedades, espacialidad. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultas de Ciencias. Escuela de Geociencias. Medellín. 553 p
- Jaramillo, J. D. F. ; M. T. Flórez. y L. N. Parra. 2006. Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Oriente antioqueño, Colombia. Suelos Ecuatoriales 36 (1): 61-71.
- Jaramillo, J. D. F. y H. Vanegas. 2007. Efecto de la temperatura de secado sobre el grado y la variabilidad espacial de la repelencia al agua en Andisoles de Antioquia, Colombia. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 60 (2): 4025 – 4035.
- Malagón, D.; C. Pulido y R. Llinás. 1991. Andisoles. Subdirección Agrológica. IGAC. Bogotá. D. C. Investigaciones 3 (1): 118
- Obando, M. F.; M. Villegas.; J. H. Betancur y L. Echeverry. 2005. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands, arenoso de la región andina central colombiana. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 59 (1): 3217 - 3235.
- Shoji, S.; M. Nanzyo; R. A. Dahlgren y P. Quantin. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for andosols in the world reference base for soil resources. Soil Science 161 (9): 604-615.
- Quevedo, H. 1984. Doce años de reconocimiento de suelos y zonificación de cultivos en la zona cafetera colombiana. Suelos ecuatoriales 14 (1): 280 – 287.
- Soil Survey Staff (SSS). 1975. Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 1a ed. Agriculture Handbook No. 436. Soil Survey Staff. Washington. D. C. 754 p.

- Soil Survey Staff (SSS). 1999. Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2a ed. Agriculture Handbook No. 436. Soil Survey Staff. Washington. D. C. 869 p.
- Soil Survey Staff (SSS). 2010. Keys to soil taxonomy. Eleventh Edition. USDA. Washington D. C. 338 p.
- Valencia, G. 1992. Química y fertilidad de los Andisoles de la zona cafetera (Colombia). Suelos ecuatoriales 22 (1): 69- 75.
- Vanegas, V. H. A. 2003. Efecto de la temperatura de secado de Andisoles bajo dos coberturas vegetales sobre el grado de hidrofobicidad que desarrollan. Trabajo de Grado Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 61 p.

3. Caracterización de la materia orgánica en Andisoles repelentes al agua

3.1 Introducción

La materia orgánica del suelo (MOS) abarca una mezcla de compuestos que van desde tejidos animales y vegetales poco alterados y productos efímeros procedentes de su descomposición, hasta un material de color pardo o negro, bastante estable, que no presenta semejanza alguna con las estructuras de las que procede; es este último material el que normalmente se designa como humus (Wild, 1992).

Según Jaramillo (2011a), la materia orgánica es el principal componente sólido que posee el suelo, ya que de alguna manera se relaciona con casi todas las propiedades del mismo (estructura, porosidad, aireación, infiltración, drenaje, humedad, consistencia, color, capacidad de intercambio catiónico, pH, hidrofobicidad, actividad biológica, etc.).

Por otra parte, desde hace muchos años DeBano *et al.* (1970), Singer y Ugolini (1976), Jaramillo (1992), Wallis *et al.* (1993), Pérez *et al.* (1998), Hallett *et al.* (2001), Peng *et al.* (2003), entre muchos otros, han reconocido que la repelencia al agua en los suelos es una función del tipo de materia orgánica incorporada en éste y que ella, a su vez, induce en los suelos hidrofobicidad por diversos mecanismos:

- Procesos de secado irreversible en la materia orgánica pueden inducir repelencia al agua, principalmente en las capas superficiales de los suelos con turba, los cuales dificultan el rehumedecimiento después del secado (Hooghoudt, 1950, citado por Dekker y Ritsema, 2000).

- Las sustancias orgánicas que se translocan desde el horizonte O, pueden inducir repelencia al agua en arenas y en otros suelos de texturas gruesas (DeBano, 1981).
- El recubrimiento de partículas minerales del suelo por productos hidrofóbicos inducen la resistencia al humedecimiento (Bond y Harris, 1964; Chan, 1992; Jaramillo, 2011c)
- La mezcla de partículas minerales del suelo con partículas de materia orgánica, especialmente los restos de las raíces y los tallos (Figura 3- 1), también induce una severa repelencia al agua (DeBano, 1969; Bisdon *et al.*, 1993; Jaramillo, 2011c).

Figura 3- 1 Materia orgánica particulada repelente al agua, mezclada con agregados finos minerales repelentes y no repelentes al agua. Tomada de Jaramillo (2011c).



Según Bendeck (2003), el componente más importante de la materia orgánica del suelo es el humus, el cual se divide en sustancias no húmicas y en sustancias húmicas, siendo estas últimas las más importantes en el suelo (Kononova, 1982), debido a las propiedades que las caracterizan: es un material coloidal, de composición indefinida, oscuro, con alta superficie específica y alta actividad química (CIC). Dependiendo de su solubilidad se puede fraccionar el humus en 3 grupos de compuestos: ácidos fúlvicos (AF), ácidos húmicos (AH) y huminas (H).

Los AH presentan una coloración entre marrón oscuro y negro, no son solubles en soluciones acuosas ácidas ($\text{pH} < 2$) pero sí lo son a valores mayores de pH. Puede extraérselos del suelo con diferentes reactivos y son la mayor fracción extraíble del mismo. Por su parte, los AF presentan un color amarillo-marrón, son solubles en soluciones acuosas con cualquier valor de pH. Por último, las huminas son de color negro, insolubles en agua a cualquier valor de pH (Stevenson, 1994).

Desde el punto de vista estructural, los AF son de menor peso molecular, contienen mayor proporción de oxígeno y menor proporción de carbono que los AH. Además, los AF contienen más grupos funcionales ácidos, principalmente grupos carboxílicos (COOH), y su acidez total es considerablemente mayor que la de los AH. Otra diferencia importante está en que el oxígeno en los AF se encuentra asociado principalmente a grupos funcionales conocidos (COOH , OH , C=O), mientras que en los AH está, en una alta proporción, como componente estructural (Kononova, 1982; Thurman, 1985; Karanfil *et al.*, 1996).

Según Jaramillo (2011b), la materia orgánica del suelo se puede caracterizar mediante muchas técnicas, dependiendo de lo que se quiera conocer en específico. De los aspectos más importantes para conocer de la MOS están la cantidad y propiedades de la fracción húmica, así como el grado de humificación que ella tiene, para lo cual se utilizan métodos de separación densitométrica y extracciones selectivas en las diferentes fracciones separadas. Varios investigadores citados por Jaramillo (2011b), señalan como aspectos importantes para la caracterización de la MOS los contenidos de carbono en los AH (CAH) y en los AF (CAF), la relación de humificación (CAH/CAF), las densidades ópticas a diferentes longitudes de onda en el espectro UV-Visible y la composición elemental de los AH.

Una de las determinaciones más simples, desde el punto de vista analítico, es la densidad óptica de los extractos obtenidos a partir de disoluciones selectivas (Ruiz, 2003). Dicha determinación consiste en disolver el material húmico en una solución básica y a esta solución medirle la absorbancia a dos longitudes de onda: 465 nm (E4) y 665 nm (E6), con las cuales se determina la relación E4/E6 (Chen *et al.*, 1977; Kononova, 1982; Ruiz, 2003), conocida como índice de humificación (Stevenson, 1982) o índice cromático (Correa, 2005). Las densidades ópticas E4 y E6 son la base de la

clasificación de los AH de Kumada (1987). Valores bajos de esta relación indican un alto grado de aromaticidad, mientras que los altos señalan un mayor contenido de cadenas alifáticas. Chen *et al.* (1977) sostienen que esta relación presenta una alta correlación con el contenido de radicales libres, O, C y -COOH, la acidez total y el peso molecular del material, los cuales están relacionados con el grado de madurez y estabilidad de los materiales orgánicos.

En la caracterización de la MOS también son utilizadas las absorbancias a 450 y 520 nm para determinar el índice melánico (IM), según la relación Abs 450/Abs 520, por el método de Honna *et al.* (ICOMAND, 1988; Motta *et al.*, 1990). Este índice es una medida del grado de humificación que ha sufrido la MOS, donde valores mayores a 1.7 implican poca humificación; además, valores iguales o menores a 1.7 se usan como criterio diagnóstico para definir la presencia de un epipedón melánico en los Andisoles (Soil Survey Staff, SSS, 1990).

Otro índice utilizado para establecer el grado de humificación de la materia orgánica del suelos, según García-Rodeja *et al.* (2004), se obtiene de la relación Corg/Alp. Ellos consideran que esta relación depende fuertemente del grado de humificación de la MOS.

La relación de humificación (CAH/CAF) es otra manera de caracterizar la fracción húmica de la MOS y establece cuál componente de ésta (AH o AF) predomina en el suelo. El valor de la relación CAH/ CAF cambia según el suelo y el horizonte de éste en que es evaluada, así como con el extractante utilizado (Tan, 1978). Rivero y Paolini (1994) encontraron relaciones entre 2 y 3 para Alfisoles y de 5,87 para un Inceptisol, en Venezuela. En términos generales, una relación baja implica un bajo grado de humificación, con mayor tamaño molecular y mayor carácter aromático en los AH que en los AF (Shoji *et al.*, 1993; Andreux, 2005; Zamboni *et al.*, 2006; Bravo *et al.*, 2007).

En este capítulo se pretende caracterizar la materia orgánica de Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula* y de rastrojo natural, y establecer si existe alguna relación entre sus propiedades y la severidad de la repelencia al agua en dichos suelos.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Caracterización del sitio experimental y muestreo

La caracterización del sitio experimental y del muestreo, se detalló en los numerales 1.2.1. y 1.2.2.

3.2.2 Procedimiento

En otra de las submuestras disponibles (ver numeral 1.2.2) se determinó el contenido de materia orgánica (MOS, %), así como algunos índices de uso corriente para caracterizarla.

Para hacer la caracterización de la MOS, se tomó 1 g de suelo seco al aire, tamizado a 2 mm, y se lavó con 10 mL de NaOH 0.1 M. El extracto obtenido fue acidificado con H_2SO_4 hasta alcanzar un pH entre 1 y 2, con lo que se obtuvo un precipitado (ácido húmico) y un extracto en el cual quedó disuelta la fracción fúlvica. Se separó la fracción húmica de la fracción fúlvica y a cada una se le determinó el contenido de carbono, teniéndose así el contenido de carbono de los ácidos húmicos (CAH, %) y el de carbono en los ácidos fúlvicos (CAF, %); con estos resultados se estableció la razón de humificación mediante la relación CAH/CAF (Tan, 1978). Todas las determinaciones de carbono se hicieron con el método de Walkley y Black (Motta *et al.*, 1990).

Con los valores de aluminio extraído con pirofosfato de sodio (Alp), presentados en el numeral 2.3.1, y transformando la materia orgánica en carbono orgánico (Corg) con la ecuación ($Corg = MOS/1.724$), se estableció la relación Corg/Alp.

En el extracto obtenido con NaOH 0.1 N, sin acidificar, se midieron las absorbancias a 465 nm (E4) y a 665 nm (E6), para establecer la relación E4/E6 (Chen *et al.*, 1977), a 450 nm y 520 nm, para establecer el IM descrito en ICOMAND (1988), y a 400 nm (k400) y a 600 nm (k600) para determinar el $\Delta \log k$ ($\Delta \log k = \log k400 - k600$) según Kumada (1987).

3.3 Resultados y discusión

3.3.1 Caracterización de la MOS

En las Tablas 3-1 y 3-2 se presentan algunos de los estadísticos básicos, y el valor p de la prueba de normalidad de Shapiro – Wilks, de las propiedades utilizadas para caracterizar la MOS de los Andisoles de la parte central de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas y de algunos suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar.

Casi todas las variables estudiadas, a excepción del IM, presentan una alta variabilidad, reflejada en los coeficientes de variación relativamente altos y en la amplitud de los rangos de valores que ellas exhiben (Tabla 3- 1).

Tabla 3- 1 Estadísticos* básicos de algunas propiedades de la materia orgánica en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* (n =22).

Variables* *	Promedio	Mediana	DE	CV (%)	Min	Max	Q1	Q3	Sesgo	Valor p
%C	13.82	14.50	3.71	26.87	1.80	21.98	12.30	15.55	-2.45	0.00
Corg/Alp	7.76	6.82	4.33	55.74	0.86	24.16	6.18	9.60	5.00	0.00
IM	1.75	1.77	0.10	5.43	1.51	1.87	1.69	1.84	-1.54	0.14
$\Delta \log k$	0.60	0.63	0.09	14.36	0.40	0.72	0.53	0.66	-1.60	0.11
E4/E6	4.05	4.20	0.74	18.38	2.50	5.28	3.37	4.59	-0.93	0.48
CAH	8.59	8.24	2.61	30.39	3.60	16.39	7.23	9.34	2.47	0.01
CAF	0.08	0.08	0.02	23.11	0.04	0.12	0.07	0.10	-0.08	0.30
CAH/CAF	108.05	98.60	45.72	42.31	46.69	219.07	74.78	118.53	2.18	0.02

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Min: Mínimo. Max: Máximo. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior. Sesgo: Sesgo estandarizado. Valor p: Valor p de Saphiro – Wilks.

** %C: Porcentaje de carbono orgánico. Corg/Alp: Relación carbono orgánico/aluminio extraído con pirofosfato de sodio. $\Delta \log k$: (log de la absorbancia a 400 nm – log de la absorbancia a 600 nm). E4/E6: absorbancia a las longitudes de onda 465 nm (E4) y 665 nm (E6). CAH: Carbono orgánico de ácidos húmicos. CAF: Carbono orgánico de ácidos fúlvicos. CAH/CAF: Relación de Carbono orgánico de ácidos húmicos/ Carbono orgánico de ácidos fúlvicos.

En general los suelos presentan un alto contenido de carbono orgánico, en su mayor parte como ácidos húmicos con bajos valores en la relación E4/E6, en el $\Delta \log k$ y el IM. Estos resultados permiten decir que la fracción húmica de la MOS de estos Andisoles repelentes al agua está conformada por AH de alto peso molecular, con bajo grado de polimerización, debido al bajo valor de la relación E4/E6, según criterios de Bravo *et al.*

(2007), y que el valor promedio del IM implica una poca humificación de la MOS (ICOMAND, 1988; Jaramillo 2011b).

Los valores mínimo y máximo (2.5 y 5.28, respectivamente) para la relación E4/E6 en los Andisoles repelentes al agua, bajo cobertura de *Pinus patula* (Tabla 3- 1), fueron similares a los reportados por Mosquera *et al.*, (2007), en Andisoles humectables de los departamentos de Caldas y Cauca (Colombia), quienes obtuvieron relaciones entre 3.8 y 7.17.

En los Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula*, la relación Corg/Alp varió entre 0.86 y 24.16, con un promedio de 7.76 (Tabla 3- 1). Además, el 95 % de las muestras presentaron un valor de Corg/Alp < 13, lo que coincide con los valores encontrados para esta misma variable, en Andisoles hidromórficos, por Jaramillo (2011b), donde las muestras presentaron un promedio de 8.64, menor que el promedio obtenido para Andisoles europeos (13) por García-Rodeja *et al.*, (2004) y de (13.8) para Andisoles de Chile por Matus *et al.* (2008).

El comportamiento de la relación Corg/Alp observado en los Andisoles repelentes al agua, sin problemas de mal drenaje, está indicando que en ellos sí hay, efectivamente, una alta saturación del humus con aluminio, como lo han establecido García-Rodeja *et al.* (2004) y como lo confirman las altas cantidades de Al intercambiable extraído con KCl (Al, Tablas 2-3 y 2-4) y de Al extraído con pirofosfato de sodio (Alp, Tabla 2- 5). Sin embargo, en dichos suelos se presenta un bajo grado de evolución de la MOS, según los valores de Corg/Alp reportados en el párrafo anterior y los obtenidos por Jaramillo (2008, 2009) en Andisoles hidromórficos. Por lo tanto, en los suelos repelentes al agua hay una alta acumulación de MOS controlada por el clima frío húmedo, tal como lo propusieron Buytaert *et al.* (2007) para Andisoles del Ecuador, y por la alta saturación con Al, confirmada por Campos *et al.* (2001), Matus *et al.* (2006, 2008) y Atanossova y Doerr (2010).

Los valores del $\Delta \log k$ (Tabla 3- 1) son bajos y similares a los encontrados por Jaramillo (2000, 2011b), y Jaramillo *et al.* (2006) en Andisoles de Piedras Blancas bajo cobertura

de *Pinus patula* y ciprés. Estos valores indican un bajo grado de humificación y unos ácidos húmicos tipo P, según Kumada (1987).

Los Andisoles bajo cobertura natural (Tabla 3- 2) en promedio presentaron un contenido de carbono orgánico similar al de los Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. En contraste, en los suelos vérticos se presentó un contenido promedio bajo de carbono orgánico, comportamiento normal teniendo en cuenta que estos suelos están en un clima cálido seco que favorece la mineralización de la MOS (Jaramillo, 2011a).

Tabla 3- 2 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura natural (n=3) y en suelos vérticos del Carmen de Bolívar (n=4)

Variables **	Andisoles				Vérticos			
	Promedio	DE	Mín.	Máx.	Promedio	DE	Mín.	Máx.
%C	12.71	3.84	8.53	16.07	2.48	1.12	1.62	4.12
Corg/Alp	9.13	5.49	5.54	15.45	13.63	3.64	8.19	15.77
IM	1.65	0.10	1.54	1.74	1.31	0.18	1.19	1.58
$\Delta \log k$	0.50	0.74	0.42	0.57	0.22	0.09	0.16	0.37
E4/E6	3.23	0.54	2.65	3.72	1.73	0.42	0.46	2.36
%CH	11.21	7.03	6.28	19.27	1.04	0.40	0.64	1.59
%CF	0.06	0.009	0.05	0.07	0.024	0.002	0.021	0.027
CAH/CAF	172.7	80.83	109.3	263.73	43.24	17.26	30.56	68.5

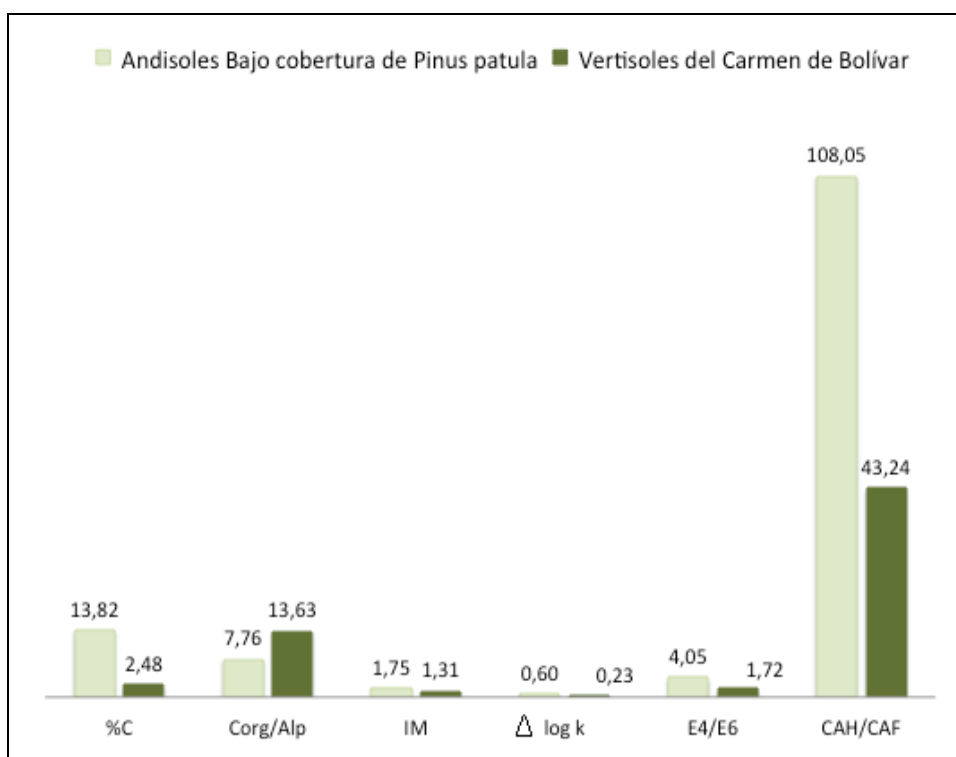
* DE: Desviación Estándar. Min: Mínimo. Max: Máximo.

** %C: Porcentaje de carbono orgánico. Corg/Alp: Relación carbono orgánico/aluminio extraído con pirofosfato de sodio. $\Delta \log k$: (log de la absorbancia a 400 nm – log de la absorbancia a 600 nm). E4/E6: absorbancia a las longitudes de onda 465 nm (E4) y 665 nm (E6). CAH: Carbono orgánico de ácidos húmicos. CAF: Carbono orgánico de ácidos fúlvicos. CAH/CAF: Relación de Carbono orgánico de ácidos húmicos/ Carbono orgánico de ácidos fúlvicos.

En la Tabla 3- 2, tanto para los Andisoles bajo cobertura natural como para los suelos con propiedades vérticas, se presentó un mayor contenido de ácidos húmicos que de ácidos fúlvicos. Además la relación CAH/CAF para estos dos suelos fue baja, siendo menor en los suelos vérticos, lo que indica un bajo grado de condensación de compuestos aromáticos, según Rivero y Paolini (1994) y Zamboni *et al.* (2006), y puede implicar, según Broquen *et al.* (2005), una actividad química relativamente alta de la materia orgánica, debida a un contenido alto de grupos funcionales en los AF, situación completamente opuesta a la encontrada en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. El comportamiento observado en estos suelos podría estar mostrando un efecto diferencial de la cobertura vegetal sobre la composición de la MOS acumulada en ellos.

En la Figura 3- 2 se observa que los valores promedios del contenido de carbono orgánico, el índice melánico, el $\Delta \log k$, la relación E4/E6 y la relación CAH/CAF, en los Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula*, son mayores que en los suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar. La única variable que presentó mayor valor promedio en los suelos vérticos fue la relación Corg/Alp, debido a la ausencia de Al intercambiable, e indicativa de un alto grado de humificación de la MOS.

Figura 3- 2 Promedio de algunas propiedades de la materia orgánica en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula*, y en algunos suelos vérticos del Carmen de Bolívar.



El valor de los índices mostrado por los suelos con propiedades vérticas está indicando que estos suelos tienen una MOS con alto contenido de ácidos fúlvicos, joven y con una fracción húmica pequeña pero muy evolucionada (Kononova, 1982; Rivero y Paolini, 1994; Izquierdo *et al.*, 2004; Broquen *et al.*, 2005; Zamboni *et al.*, 2006; Rodríguez *et al.*, 2010; Jaramillo, 2011b).

El valor de Corg/Alp en los suelos vérticos del Carmen de Bolívar es indicativo de una baja saturación con Al en la MOS de estos suelos. Las características químicas de estos suelos (Tabla 2- 4) confirman esta aseveración, pues el pH de ellos no permite la solubilización del Al (Jaramillo, 2011a); en cambio, el complejo de cambio en los mismos se encuentra saturado completamente con cationes básicos y buena parte de su MOS está complejada con los mismos y no con aluminio.

3.3.2 Análisis de correlación

Los coeficientes de correlación lineal entre las propiedades relacionadas con la calidad de la materia orgánica y la severidad de la repelencia al agua, en las condiciones de secado al aire y a 105 °C (PEa y PE105) para todas las muestras de Andisoles se presentan en la Tabla 3- 3. Cabe anotar que para las muestras de suelos del Carmen de Bolívar (suelos con propiedades vérticas), no se realizó análisis de correlación con la severidad de la repelencia al agua, debido a que todas las muestras fueron humectables, pero sí se realizó para los diferentes índices de calidad de la MOS (Tabla 3- 5). En las Tablas 3-3, 3-4 y 3-5, aquellos coeficientes que aparecen resaltados en negrilla, indican una correlación significativa estadísticamente al 95 %.

Tabla 3- 3 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua y algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* y natural (n = 25).

	PEa	PE105	C	Corg/Alp	IM	$\Delta\log k$	E4/E6
PE105	0.662						
C	0.326	0.404					
Corg/Alp	0.507	0.391	0.716				
IM	-0.030	0.126	0.381	0.265			
$\Delta\log k$	0.087	0.350	0.558	0.422	0.793		
E4/E6	0.067	0.348	0.557	0.443	0.798	0.994	
CAH/CAF	-0.062	-0.165	-0.270	-0.078	0.083	-0.116	-0.121

Tabla 3- 4 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua y algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* (n = 22).

	PEa	PE105	C	Corg/Alp	IM	$\Delta \log k$	E4/E6
PE105	0.698						
C	0.274	0.367					
Corg/Alp	0.427	0.416	0.740				
IM	-0.047	0.010	0.452	0.328			
$\Delta \log k$	0.091	0.272	0.651	0.519	0.748		
E4/E6	0.075	0.268	0.641	0.548	0.758	0.994	
CAH/CAF	0.059	0.053	-0.129	-0.030	0.100	-0.052	-0.047

La ausencia de correlación significativa entre la severidad de la repelencia y el contenido de carbono orgánico, cuando se analizan sólo las muestras de suelos bajo *Pinus patula* (Tabla 3- 4), está ratificando observaciones hechas anteriormente por Jaramillo (2011c) en las que tampoco se presentó esta relación y se concluyó que la repelencia dependía más de la calidad que de la cantidad de MOS en el suelo. Cuando se incluyen en el análisis las muestras de Andisoles bajo cobertura natural (Tabla 3- 5), se presenta una baja correlación entre el carbono orgánico y el PE105, con un R^2 de apenas 16.32 %, y sigue ausente la correlación carbono orgánico – PEa, reafirmando lo expresado sobre la importancia de la calidad de la MOS sobre la repelencia al agua en el suelo.

Tabla 3- 5 Coeficientes de correlación entre la severidad de la repelencia al agua y algunas propiedades relacionadas con la materia orgánica, en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana (n = 4).

	C	Corg/Alp	IM	$\Delta \log k$	E4/E6
Corg/Alp	0.166				
IM	-0.443	0.495			
$\Delta \log k$	-0.480	0.474	0.991		
E4/E6	-0.482	0.465	0.998	-0.999	
CAH/CAF	-0.254	-0.960	-0.246	-0.226	-0.216

Vale la pena destacar los altos coeficientes de correlación encontrados entre E4/E6 - $\Delta \log k$ - IM, bajo las diferentes coberturas y tipos de suelo estudiados, que están mostrando que prácticamente todos estos índices miden lo mismo, apreciación justificada si se tiene en cuenta que todos miden absorbancias dentro de un rango muy estrecho de

longitud de onda. Jaramillo (2011b) encontró también alta correlación entre E4/E6 - $\Delta \log k$ en Andisoles hidromórficos del oriente antioqueño, con cobertura de pastos, pero no entre estos dos índices con el IM, lo que podría estar mostrando un efecto importante de la cobertura vegetal y/o de la condición de drenaje sobre algunas compuestos de la MOS en estos suelos.

3.4 Conclusiones

- Los Andisoles repelentes al agua bajo cobertura de *Pinus patula* y natural, presentaron un alto contenido de carbono orgánico con composición dominante de ácidos húmicos de alto peso molecular y bajo grado de polimerización, y bajos valores en la relación E4/E6, en el $\Delta \log k$ y el IM.
- Según la relación Corg/Alp, en los Andisoles repelentes al agua hay una acumulación alta de MOS, controlada por el clima frío húmedo y por una alta saturación con Al en ella.
- No se presentó correlación significativa entre el contenido de carbono orgánico y la severidad de la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de pino, lo que ratifica que el fenómeno de la hidrofobicidad depende más de la calidad que de la cantidad de materia orgánica que se le aporte al suelo.

3.5 Bibliografía

- Andreux, F. 2005. La materia orgánica del suelo desde la perspectiva pedogenética. En: Memorias Seminario Materia Orgánica y microorganismos en la Agricultura Colombiana. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 24 p.
- Atanassova, I. and S. Doeer. 2010. Organic compounds of different extractability in total solvent extracts from soils of contrasting water repellency. European Journal of Soil Science. 61, 298 - 313.
- Bendeck, M. 2003. Origen y formación del humus. En: Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 9 p.

- Bisdorf, E. B. A.; L. W. Dekker and J. F. Schoute. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material and soil structure. *Geoderma* 56. 105 – 118.
- Bond, R. D. and J. R. Harris. 1964. The influence of the microflora on physical properties of soils: I. Effect associated with filamentous algae and fungi. *Aust. J. Soil Res.* 2: 111 – 122.
- Bravo, I.; L. Marquinez y S. Potosí. 2007. Fraccionamiento del fósforo y correlación con la materia orgánica en dos suelos del departamento del Cauca. *Suelos Ecuatoriales* 37(2):147-154.
- Broquen, P.; J. C. Lobartini.; F. Candan and G. Falbo. 2005. Allophane, aluminum, and organic matter accumulation across a bioclimatic sequence of volcanic ash soils of Argentina. *Geoderma* 129:167-177.
- Buytaert, W.; J. Deckers and G. Wyseure. 2007. Regional variability of volcanic ash soils in south Ecuador: The relation with parent material, climate and land use. *Catena* 70: 143- 154.
- Campos, A.; K. Oleschko.; L. Cruz.; J. Etchevers and C. Hidalgo. 2001. Estimación de alofano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. *Terra* 19 (2): 105-116.
- Chan, K. Y. 1992. Development of seasonal water-repellence under direct drilling. *Journal of the Soil Science Society of America* 56. 326–329.
- Chen, Y.; N. Senesi and M. Schnitzer. 1977. Information provided on humic substances by E4/E6 ratios. *Soil Science Society American Journal* 41:352-358.
- Correa, A. 2005. Pasado y futuro de los estudios de la materia orgánica del suelo en Colombia. En: *Memorias Seminario Materia Orgánica y microorganismos en la Agricultura Colombiana*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 21 p.
- DeBano, L. F. 1969. Water repellent soils: a worldwide concern in management of soil and vegetation. *Agric. Sci. Rev.* 7(2): 11-18.
- DeBano, L. F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. Gen. Tech. Rep. PSW-46. Pacific Southwest Forest and Range. Experiment Station. 21p.
- DeBano, L. F.; L. D. Manna and D. A. Hamilton. 1970. Translocation of hydrophobic substances into soil by burning organic litter. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34: 130 - 133.
- Dekker, L. W. and C. J. Ritsema. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *J. Hydrol.* 231-232: 4-32.

- García – Rodeja, E.; Novoa. J. C.; Pontevedra. X.; Martínez Cortizas. A and P. Buurman. 2004. Aluminium fractionation of European volcanic soils by selective dissolution techniques. *Catena* 56:155-183.
- Hallett, P. D.; T. Baumgartl and I. M. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management. *Soil Sci. Am. J.* 65: 184 - 190.
- ICOMAND. 1988. Circular letter No 10. Leamy. M. L. Editor. New Zealand Soil Bureau. New Zealand. 80 p.
- Izquierdo, M.; J. Antelo.; S. Fio.; D. Gondar.; A. Iglesias.; R. López. y F. Arce. 2004. Caracterización de ácidos fúlvicos y ácidos húmicos extraídos de una turbera minerotrófica. *Revista Edafología.* 11 (3): 329 - 339.
- Jaramillo, J. D. F. 1992. Relación entre la acumulación de acículas (Litter) de *Pinus patula* y la hidrofobicidad en algunos Andisoles de Antioquia. Tesis Magíster en Suelos y Aguas. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 95 p.
- Jaramillo, J. D. F. 2000. Caracterización preliminar de los compuestos hidrofóbicos removidos de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 53(1):801-821.
- Jaramillo, J. D. F. 2008. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del epipedón de un Andisol hidromórfico del Oriente antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín.* 61 (2): 4588-4599.
- Jaramillo, J. D. F. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un Andisol hidromórfico del Oriente antioqueño (Colombia). *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín.* 62 (1):4907-4921
- Jaramillo, J. D. F. 2011a. El suelo: Origen. propiedades. espacialidad. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. Facultad de Ciencias. Escuela de Geociencias. Medellín. 553 p.
- Jaramillo, J. D. F. 2011b. Caracterización de la materia orgánica del horizonte superficial de un Andisol hidromórfico del Oriente antioqueño (Colombia). *Rev. Acad. Colomb. Cienc.* 35(134): 23 – 33.
- Jaramillo, J. D. F. 2011c. Repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 218 p.
- Jaramillo, J. D. F.; M. T. Flórez. y L. N. Parra. 2006. Caracterización de un Andisol de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, Oriente antioqueño, Colombia. *Suelos Ecuatoriales* 36 (1): 61-71.

- Karanfil, T. M. A.; J. E. Schlautman.; W. J. Kilduff and J. Weber. 1996. Adsorption of organic macromolecules by granular activated carbon. 2. Influence of dissolved oxygen. *Environmental Science and Technology*. 30: 2195 - 2201.
- Kononova, M. 1982. *Materia orgánica del suelo: su naturaleza, propiedades y métodos de investigación*. Oikos-Tau. Barcelona. 365 p.
- Kumada, K. 1987. *Chemistry of soil organic matter*. Japan Scientific Societies Press. Tokio. 240 p.
- Matus, F.; E. Garrido.; N.Sepúlveda.; I.Cárcamo.; M. Panechini and E. Zagal. 2008. Relationship between extractable Al and organic C in volcanic soils of Chile. *Geoderma* 148:180-188.
- Matus, F.; X. Amigo. and S. M. Kristiansen, 2006. Aluminium stabilization controls organic carbon levels in Chilean volcanic soils. *Geoderma* 132:158-168.
- Mosquera, C.; I. Bravo and E. Hansen. 2007. Comportamiento estructural de los ácidos húmicos obtenidos de un suelo Andisol del departamento del Cauca. *Revista Colombiana de Química* 36(1): 31-41.
- Motta. B.; C.Rodríguez.; H. Montenegro.; J. Marulanda.; A. Correa y M. Bendeck. 1990. *Métodos analíticos del Laboratorio de Suelos*. 5a ed. IGAC. Bogotá. 502 p.
- Peng, X.; B. Zhang.; Q. Zhao.; R. Horn and P. C. Hallett.. 2003. Influence of types of restorative vegetation on the wetting properties of aggregates in a severely degraded clayey Ultisol in subtropical China. *Geoderma*. 115: 313 - 324.
- Pérez, D. V.; S. M. Sinão e A. Salatino. 1998. Identificação e caracterização da repelencia a agua em alguns solos brasileiros. *R. Bras. Ci. Solo*. 22: 197 - 207.
- Rivero, C. y Paolini, J. 1994. Caracterización de la materia orgánica de tres suelos venezolanos. *Revista Facultad de Agronomía (Maracay)* 20:167-176.
- Rodríguez, M.; J. Vanegas.; M. V. Angoa y J. L. Montañez. 2010. Extracción secuencial y caracterización fisicoquímica de ácidos húmicos en diferentes compost y el efecto sobre el trigo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 1 (2) 133 - 147.
- Ruiz, O. 2003. Sustancias húmicas e índices de humificación. En: *Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Comité Regional de Antioquia. Medellín. CD-Room. 13 p.
- Singer, M. J. and F. C. Ugolini. 1976. Hydrophobicity in the soils of Findley Lake. *Washington. Forest Sci*. 22: 54 - 58.
- Shoji, S.; R. Dahlgren and M. Nanzyo. 1993. Genesis of volcanic ash soils. In: *Volcanic ash soils: genesis. properties and utilization*. Shoji S. M. Nanzyo and R.

Dahlgren editors. Developments in Soil Science 21. Elsevier Science Publishers. Ámsterdam. pp. 37-71.

- Soil Survey Staff (SSS). 1990. Soil Taxonomy. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2a ed. Agriculture Handbook No. 436. Soil Survey Staff. Washington. D. C. 869.
- Stevenson, F. J. 1994. Humus Chemistry. Genesis. Composition. Reactions. John Wiley and Sons: Nueva York. USA. 512 páginas.
- Stevenson. F. 1982. Humus chemistry: genesis composition reactions. Wiley. New York. 443 p.
- Tan, K. H. 1978. Variations in soil humic compounds as related to regional and analytical differences. Soil Science 125(6):351- 358.
- Thurman, E. M. 1985. Organic geochemistry of natural waters. Editado por M. Nijhoff. Dr W.Junk Publishers. Dordrecht. Holanda. 516 páginas.
- Wallis, M. G.; D. J. Horne and A. S. Palmer. 1993. Water repellency in New Zealand development sequence of Yellow-Brown sands. Aust. J. Soil. Res. 31: 641 - 654
- Wild, A. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell. Madrid (España). Universidad Politécnica de Madrid. 595 – 635 p.
- Zamboni, I.; M. I Ballesteros and A. M. Zamudio. 2006. Caracterización de ácidos húmicos y fúlvicos de un Mollisol bajo dos coberturas diferentes. Revista Colombiana de Química 35(2):191-203.

4. Caracterización de compuestos orgánicos extraídos con isopropanol – amoniacal en Andisoles repelentes al agua

4.1 Introducción

La dificultad para humedecer los suelos o hidrofobicidad se debe, principalmente, a la acumulación de ciertos compuestos orgánicos en él, los cuales pueden producirse por el metabolismo y/o la descomposición de organismos vegetales y microbiales (Doerr *et al.*, 2000). Los exudados metabólicos de éstos y los productos de su descomposición contienen sustancias como aceites, grasas, resinas, ceras y ácidos orgánicos con características hidrofóbicas que al ser depositados sobre la superficie de los sólidos del suelo, forman películas de compuestos hidrofóbicos sobre ellos y le transmiten la repelencia al agua a éste (Jaramillo, 1996).

Entre los grupos de compuestos orgánicos que más frecuentemente se han encontrado asociados con la hidrofobicidad de los suelos, han sido identificados ácidos grasos de cadenas largas (Li, 1978; Ma'Shum *et al.*, 1988) y ácidos fenólicos con carácter alifático predominante (Giovannini y Lucchesi, 1984).

Según Doerr *et al.* (2000), hay dos grupos de compuestos responsables de la repelencia al agua en el suelo. Uno está constituido por hidrocarburos alifáticos de cadenas largas, no polares y casi insolubles en agua, y el otro por compuestos de estructura anfifílica, es decir, compuestos que tienen una parte terminal polar y otra no polar: la parte polar es hidrofílica, mientras que la no polar es hidrofóbica. Los compuestos de este último grupo, que comprenden principalmente ácidos grasos, ésteres y sales de ácidos grasos,

parecen ser los principales componentes de los recubrimientos orgánicos observados en los suelos repelentes al agua.

Horne y McIntosh (2000), sometieron muestras de suelos arenosos, repelentes al agua, a una extracción selectiva con varios solventes orgánicos y encontraron que las sustancias extraídas se podían reunir en dos grupos: uno formado por lípidos y el otro por compuestos solubles en agua. En los lípidos diferenciaron tres subgrupos: lípidos neutros (alcanos y triglicéridos), lípidos ácidos (ácidos grasos de cadenas largas) y lípidos polares (ácidos húmicos). La fracción soluble en agua fue muy similar a los ácidos himatomelánicos y tuvo un comportamiento anfifílico.

Poulenard *et al.* (2004), encontraron que la abundancia de ácidos grasos de cadena larga y de ceras en horizontes superficiales de suelos derivados de ceniza volcánica, contribuía al desarrollo de la repelencia al agua en ellos después del secado.

Senesi *et al.* (1983) halló que los compuestos orgánicos removidos de suelos humectables con solventes orgánicos no polares (benceno entre ellos) fueron complejos alifáticos heterogéneos formados por diversos tipos de lípidos como grasas, ceras, terpenos, esteroides, etc., los cuales son sustancias consideradas no húmicas.

Roy *et al.* (1999), lavaron suelos repelentes al agua, provenientes de derrames de petróleo, con varios solventes orgánicos y sometieron los extractos a cromatografía de gases y espectroscopia de masas, encontrando que los compuestos repelentes al agua correspondían a series homólogas de compuestos orgánicos alifáticos policíclicos de cadena larga, principalmente n-ácidos grasos y cicloalcanos, todos originados más en el petróleo que en la vegetación o en los microorganismos.

Llewellyn *et al.* (2004), utilizando la técnica de extracción en soxhlet, en suelos arenosos del Reino Unido, identificaron cinco grupos de compuestos responsables de la repelencia al agua: ácidos carboxílicos, amidas, alcanos, aldehídos y compuestos aromáticos.

Mainwaring *et al.* (2004), al realizar un análisis de cromatografía obtuvieron 37 picos, donde los principales compuestos que identificaron como responsables de la repelencia

fueron: ácidos grasos, amidas, alcanos, aldehídos, cetonas, y compuestos con estructuras aromáticas.

Morley *et al.* (2005), sometieron muestras de suelos arenosos repelentes al agua, bajo cobertura de pastos, a extracción exhaustiva con una mezcla de isopropanol – amoníaco (7:3, v:v), hasta una profundidad de 40 cm, con el fin de identificar los compuestos orgánicos presentes, obteniendo como resultado ácidos carboxílicos de cadena larga, amidas, alcanos, aldehídos, cetonas y estructuras más complejas

Jaramillo (1996) sometió varias muestras de Andisoles repelentes al agua a extracción secuencial, en soxhlet, con mezclas de etanol – benceno (1:2, v:v) y de isopropanol – amoníaco (7:3, v:v), y encontró que la repelencia al agua desaparecía en casi todos los suelos, después de lavarlos con la mezcla de isopropanol – amoníaco, mientras que la reducción en el grado de hidrofobicidad, producida por el lavado con la mezcla de etanol – benceno, no fue significativa en la gran mayoría de las muestras.

Con base en espectros infrarrojos y ultravioleta visibles de extractos obtenidos de Andisoles con diferentes grados de repelencia al agua, Jaramillo (2000) concluyó que los compuestos responsables de la hidrofobicidad correspondían a ácidos carboxílicos alifáticos de cadenas largas.

En este capítulo se pretende identificar los principales compuestos orgánicos presentes en extractos obtenidos por lavado con una mezcla de isopropanol – amoníaco en proporción 7:3 (v:v), de Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula* y rastrojo natural.

4.2 Materiales y métodos

4.2.1 Caracterización del sitio experimental y muestreo

El sitio experimental es el mismo descrito y caracterizado en los numerales 1.2.1. y 1.2.2. Para extraer y caracterizar los compuestos orgánicos presentes en los suelos se utilizó la tercera submuestra de suelo (ver numeral 1.2.2).

4.2.2 Procedimiento

En la Figura 4- 1 se esquematiza el procedimiento general seguido en este trabajo. En cada muestra, secada al aire, se tomó una submuestra en la que se evaluó la severidad de la repelencia al agua empleando el método del porcentaje de la solución acuosa de alcohol etílico que penetró en el suelo en 5 segundos o menos (PEa), utilizado por Dekker y Ritsema (1994), y descrito en el numeral 1.2.3. (pág. 12).

Del resto de cada submuestra secada al aire se tomaron 100 g y se sometieron a extracción exhaustiva, mediante lavado en soxhlet, con 1000 mL de una mezcla de isopropanol – amoniaco en proporción 7:3 (v:v), ambos reactivos de grado analítico. El lavado se llevó a cabo hasta que el solvente pasó limpio a través de la muestra de suelo. Terminada la extracción, el suelo se volvió a secar al aire y a 105 °C y se le determinó nuevamente la severidad de la repelencia al agua (PEad y PE105d, respectivamente).

Los extractos obtenidos se concentraron con un rotoevaporador hasta que quedaron libres del solvente y se les hizo un análisis de cromatografía de gases con detector selectivo de masas AGILENT TECHNOLOGIES 6890N/5973N, con helio como gas de arrastre, al cual se le inyectó automáticamente 1 µL de extracto a una temperatura de 250 °C. El tiempo total de corrida fue de 60 minutos. Para la separación se usó una columna AGILENT DB-5MS de 30 m de longitud, 0.32 mm de diámetro y con espesor de la fase estacionaria de 0.5 µm. El espectro de masas se evaluó en el rango entre 30 y 800 uma, con un tiempo de espera para el solvente de 6 minutos y temperatura de la fuente entre 230 y 250 °C.

Figura 4- 1 Esquema general del procedimiento realizado para la extracción e identificación de los compuestos orgánicos encontrados en Andisoles de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en algunos suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.



Como resultado de la cromatografía se produjo un cromatograma con todos los picos identificados en el tiempo transcurrido hasta su aparición. Los picos se compararon con los almacenados en la base de datos NIST02L del equipo, para establecer la clasificación del compuesto que más probablemente lo originó. El compuesto se identificó con el nombre que presentó una probabilidad mayor al 80 % de coincidir con el compuesto extraído.

Para el análisis final de los resultados se estableció la frecuencia con la cual se presentó cada compuesto y luego se agruparon en familias de compuestos generales, para facilitar su entendimiento y discusión.

4.3 Resultados y discusión

4.3.1 Efecto del lavado con isopropanol – amoniaco sobre la severidad de la repelencia al agua en suelos.

En la Tabla 4-1 se presentan algunos de los estadísticos que caracterizaron la severidad de la repelencia al agua de las muestras secadas al aire y a 105 °C, antes de la extracción (PEa, PE105a) y después de la misma (PEad y PE105d, respectivamente), bajo cobertura de *Pinus patula*. No se incluyen las muestras de Andisoles bajo cobertura natural debido a que el PEad y el PE105d, para las tres muestras analizadas, fue de 1 y 2 respectivamente. En los suelos con propiedades vérticas, todas las muestras presentaron un PE de 0 en todas las condiciones evaluadas. Sólo se tuvieron en cuenta los valores de PEa y PE105 porque, como se mostró en la primera parte de este documento, ellos caracterizan toda la severidad posible de la repelencia al agua en estos suelos.

En la Tabla 4-1 se observa que el coeficiente de variación aumentó después de hacer la extracción, para las muestras de suelo secadas al aire y a 105 °C. Este comportamiento se puede deber a que el incremento en la temperatura a la cual fueron expuestas las muestras durante la extracción, y la consecuente deshidratación, produjo cambios estructurales diferenciales en los compuestos orgánicos del suelo (Jaramillo *et al.*, 1997, Doerr *et al.*, 2000).

Tabla 4-1 Estadísticos básicos que caracterizaron el efecto del lavado con isopropanol - amoniaco sobre la severidad de la repelencia al agua de las muestras secadas al aire y a 105 °C, antes y después de la extracción, bajo cobertura de *Pinus patula*, en la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño. (n=21*).

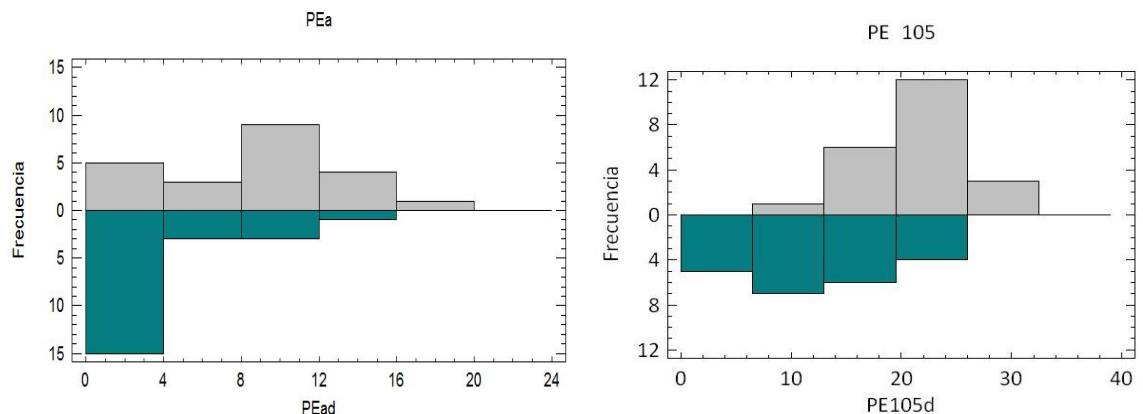
Estadísticos básicos	PEa	PE105**	PEad	PE105d
Promedio (%)	9.52	21.67	3.85	13.14
Moda (%)	12	24	1	11
Desviación estándar	5.31	4.26	3.86	7.25
Coeficiente de Variación (%)	55.72	19.65	100.17	55.20
Máximo (%)	20	28	14	26
Mínimo (%)	1	12	1	1
Cuartil inferior (%)	8	18	1	10
Cuartil superior (%)	12	24	5	18

* Sólo se trabajó con 21 de las 22 muestras propuestas inicialmente, debido a que una de ellas se perdió accidentalmente.

** Los estadísticos de PE105 con base en resultados obtenidos para esta variable en la caracterización de la severidad de la repelencia al agua (numeral 1).

En la Figura 4- 2 se observa que el secado de las muestras a 105 °C, antes y después de la extracción, aumentó la severidad de la repelencia al agua con respecto a la medida en las muestras secadas al aire, comportamiento ampliamente conocido y reportado en la cuenca de Piedras Blancas por Jaramillo (2003, 2011), Vanegas (2003) y Jaramillo y Vanegas (2007). También se observa que la severidad de la repelencia al agua presentó altos valores en el coeficiente de variación y teniendo en cuenta el tamaño pequeño del lote experimental (1600 m²), se confirma la alta variabilidad que se ha obtenido en otros estudios de hidrofobicidad del suelo realizados en la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, también en Andisoles (Jaramillo, 2003, 2011; Vanegas, 2003).

Figura 4- 2 Distribución de las muestras secadas al aire y a 105 °C, por grado de severidad de la repelencia al agua, en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula*, antes y después de ser lavados con una mezcla de isopropanol-amoniaco 7:3 (n=21).



El lavado de las muestras con isopropanol-amoniaco, aunque produjo una reducción global de la hidrofobicidad en la mayoría de los suelos (Figura 4- 2), no eliminó la repelencia al agua en ninguno de ellos, contrario a lo que obtuvieron Ma'shum *et al.* (1988) y Atanassova y Doerr (2010) en suelos de textura gruesa de Australia. La repelencia al agua remanente en suelos lavados con isopropanol - amoniaco ya ha sido observada en otros trabajos realizados con Andisoles en Piedras Blancas (Jaramillo, 1996, 2011; Jaramillo *et al.* 1997) y parece ratificar la hipótesis de Jaramillo (2006, 2011) de que hay una respuesta diferencial de cada suelo al lavado, consecuencia de la acumulación específica, tanto en cantidad como en composición, de la materia orgánica en cada uno de ellos.

En la Tabla 4- 2 se observa que las muestras CP11, CP17 y CP20, secadas al aire, y la CP20 secada a 105 °C, aumentaron el valor de PE después de la extracción (resaltadas en negrilla en la Tabla 4- 2). Cabe anotar que los suelos bajo cobertura de *Pinus patula*, presentan una severidad de la repelencia al agua mayor, antes y después de la extracción, que la de los suelos bajo cobertura natural, probablemente debido a diferencias en el tipo de materia orgánica que se ha acumulado en ellos (Doerr *et al.* 2005).

Tabla 4- 2 Severidad de la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula* (n=22) y natural (n=3) de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana, antes y después de ser lavados con una mezcla de isopropanol - amoniaco (7:3).

Muestras	PEa	PEad	PE105*	PE105d
Andisoles bajo cobertura de <i>Pinus patula</i> (CP)				
CP1	12	5	28	16
CP2	12	1	20	3
CP3	4	1	12	1
CP4	1	1	17	10
CP5	1	1	18	2
CP6	20	11	26	24
CP7	10	1	20	1
CP8	8	1	16	1
CP9	8	2	22	12
CP10	12	1	21	11
CP11	8	9	19	16
CP12	10	1	18	13
CP13	13	9	27	21
CP14	14	2	24	18
CP15	1	1	22	14
CP16	12	5	26	12
CP17	2	6	18	10
CP18	10	1	23	14
CP19	16	2	28	11
CP20	10	14	24	26
CP21	16	4	24	19
CP22	10	3	22	22

Tabla 4- 2 Continuación.

Andisoles bajo cobertura natural (CN)				
CN1	1	1	2	1
CN2	10	1	11	1
CN3	1	1	1	1
Vérticos (CB)				
CB1	0	0	0	0
CB2	0	0	0	0
CB3	0	0	0	0
CB4	0	0	0	0

* Los valores de PE105 tomados de los resultados obtenidos en el Capítulo 1.

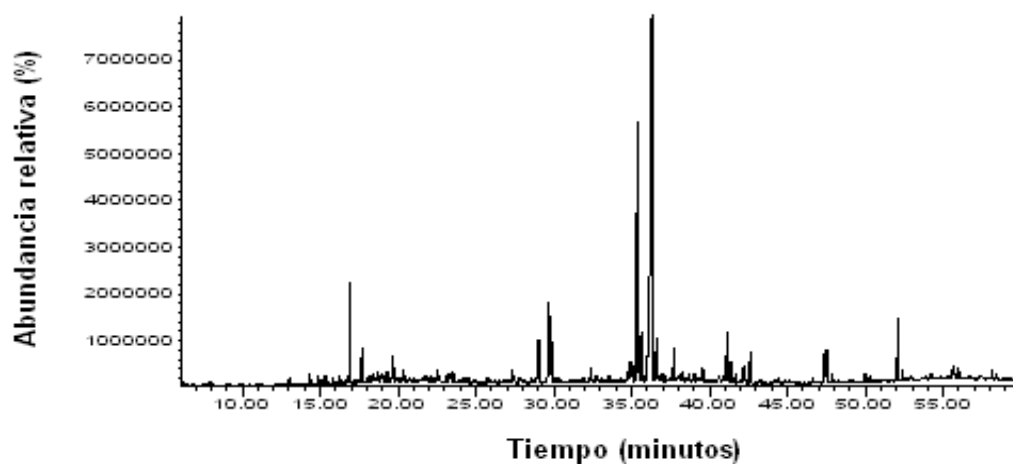
El lavado con isopropanol - amoniaco de las muestras provenientes del Carmen de Bolívar, no produjo ningún cambio en su comportamiento con respecto a la repelencia al agua (Tabla 4- 2).

4.3.2 Caracterización de los compuestos orgánicos extraídos de los suelos.

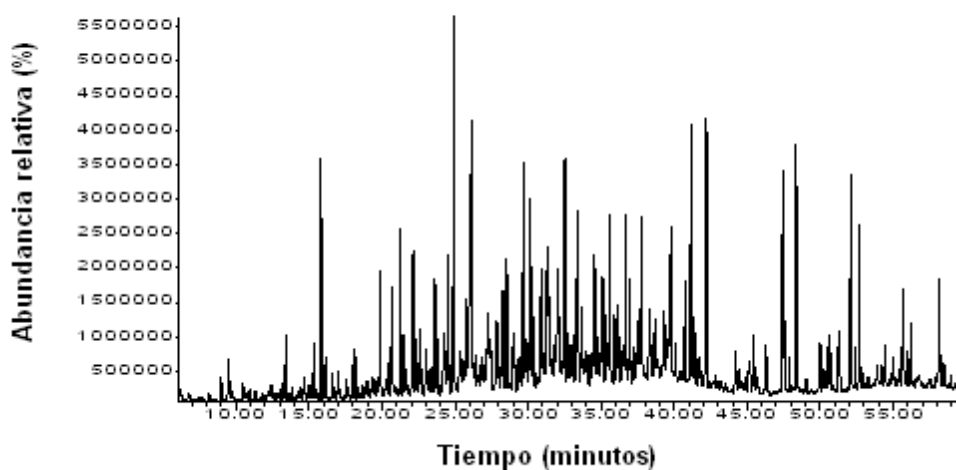
Los análisis de cromatografía mostraron una alta variación en la cantidad y tipo de compuestos extraídos de los suelos. Ellos alternaron entre 34, en la muestra CP6, y 135 en la muestra CP21, para las muestras de suelos repelentes al agua bajo cobertura de *Pinus patula*, como se muestra en la Figura 4- 3.

Las muestras de los suelos bajo cobertura natural y de los suelos vérticos del Carmen de Bolívar también mostraron una amplia variación en la cantidad y tipo de compuestos orgánicos removidos de ellos. Se presentaron 73, 68 y 29 compuestos en los Andisoles bajo cobertura natural, y 83, 77 y 44 en los suelos vérticos del Carmen de Bolívar (Figura 4- 4). En el Anexo 1 se presentan los cromatogramas de las 27 muestras analizadas.

Figura 4- 3 Cromatogramas de los extractos de la muestras (a) CP6 y (b) CP21 de Andisoles repelentes al agua de la cuenca media de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula*, lavados con una mezcla de isopropanol – amoníaco (7:3).

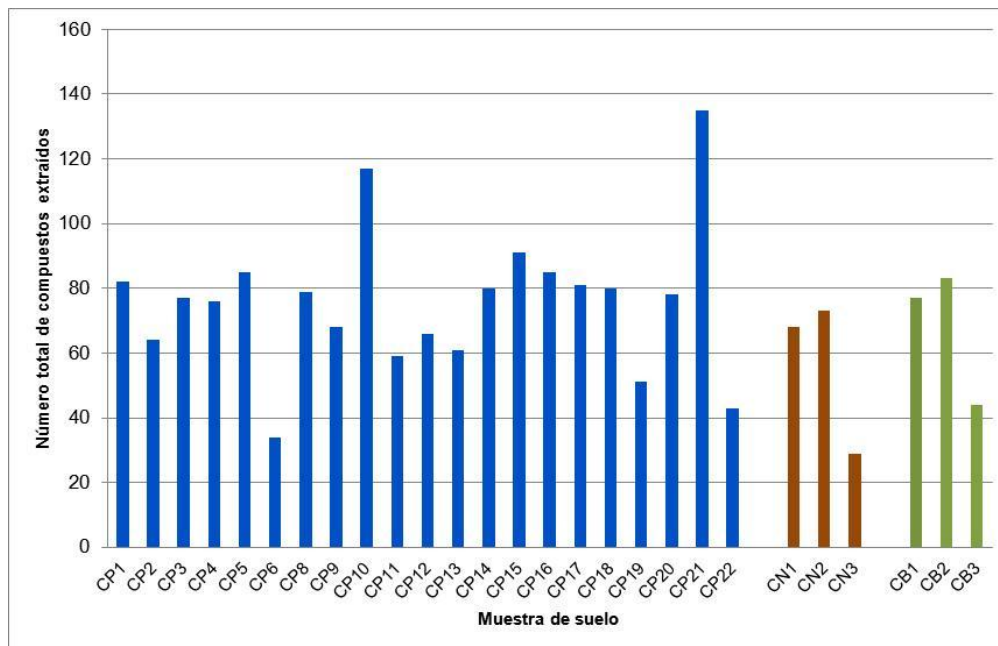


(a)



(b)

Figura 4- 4 Cantidad total de compuestos extraídos en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula* y natural de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.



Una vez identificados los compuestos con el nombre de aquel con el que presentaron una probabilidad mayor al 80 % de coincidir en la base de datos del equipo CG-EM, se encontraron en total, para las 27 muestras analizadas, 256 compuestos diferentes, de los cuales 24 no pudieron identificarse (NN), 102 se presentaron sólo una vez, en una sola muestra, y 25 estuvieron en más de 10 muestras, como se observa en el Anexo 2, ratificando la alta variabilidad en la composición de las muestras.

Los compuestos que se presentaron con mayor frecuencia, tanto en Andisoles como en suelos con propiedades vérticas, fueron el ácido (Z)-Octadec-9-enoico y la Hexadecanamida (Tabla 4- 3). Los compuestos que aparecen resaltados en negrilla (Tabla 4- 3) han sido reportados por Atanassova y Doerr (2010) Morley *et al.* (2005) y Franco *et al.* (2000), en suelos repelentes al agua.

Tabla 4- 3 Compuestos presentes con mayor frecuencia en muestras de Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.

Nombre IUPAC	Formula	CP	CN	CB	Total
Ácido (Z)-Octadec-9-enoico	C₁₈H₃₄O₂	19	3	3	25
Hexadecanamida	C₁₆H₃₃NO	19	3	3	25
Ácido pentadecanoico	C₁₅H₃₀O₂	19	3	2	24
Ácido octadecanoico	C₁₈H₃₆O₂	18	3	2	23
Metilo tetradecanoato	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	18	3	2	23
Ácido hexadecanoico	C₁₆H₃₂O₂	17	3	3	23
Ácido dodecanoico	C₁₂H₂₄O₂	16	3	2	21
Ácido benceno-1,2-dicarboxílico	C₈H₆O₄	17	1	2	20
Eicosano	C ₂₀ H ₄₂	18	1	0	19
Ácido eicosanoico	C₂₀H₄₀O₂	14	3	1	18
Ácido nonanedioico	C ₉ H ₁₆ O ₄	15	2	1	18
<i>1-Fenantrenecarboxaldehído, 1,2,3,4,4 a, 9,10,10 a-octahidro-1, 4a-dimetil-7-(1-metiletil) -, [1R-(1α, 4αβ, 10α)] -</i>	<i>C₂₀H₈O</i>	<i>17</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>17</i>
Ácido henicosanoico	C₂₁H₄₂O₂	13	2	1	16
Ácido (E)-Hexadec-9-enoico	C ₁₆ H ₃₀ O ₂	11	3	2	16
6,10,14-Trimetil pentadecan-2-ona	C ₁₈ H ₃₆ O	12	2	1	15
Ácido octanodioico	C ₈ H ₁₄ O ₄	11	2	1	14
(E)-Heptadec-15-enal	C ₁₇ H ₃₂ O	10	3	0	13
Ácido tetradecanoico	C ₁₄ H ₂₈ O ₂	9	2	1	12
Ácido (9Z, 12Z)-octadeca-9,12-dienoico	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	7	3	2	12
<i>2-Fenantrenol, 4b, 5,6,7,8,8 a, 9,10-octahidro-4b,8,8-trimetil-1-(1-metiletil) -, (4bS-trans) -</i>	<i>C₂₀H₃₀O</i>	<i>11</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>11</i>
<i>α-Farneseno</i>	<i>C₁₅H₂₄</i>	<i>11</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>11</i>
Ciclotetradecano	C ₁₄ H ₂₈	8	1	2	11
(Z)-Octadec-9-enamida	C ₁₈ H ₃₅ NO	6	3	2	11
Ácido 12-metil tetradecanoico	C ₁₅ H ₃₀ O ₂	8	1	1	10
Heptadecano	C ₁₇ H ₃₆	6	3	1	10
Octadecano	C ₁₈ H ₃₈	8	1	1	10

Cabe resaltar que los compuestos presentados en cursiva, no se han reportado en la literatura para suelos hidrofóbicos y en este trabajo sólo se presentaron en Andisoles repelentes al agua, bajo cobertura de *Pinus patula*, y con alta frecuencia (Tabla 4- 3). En la Tabla 4- 4 se presentan los compuestos que estuvieron presentes únicamente en los

suelos con propiedades vérticas (suelos humectables), y los que estuvieron sólo en Andisoles (162) se presentan en el Anexo 2.

Tabla 4- 4 Compuestos presentes únicamente en suelos vérticos del Carmen de Bolívar (n=3).

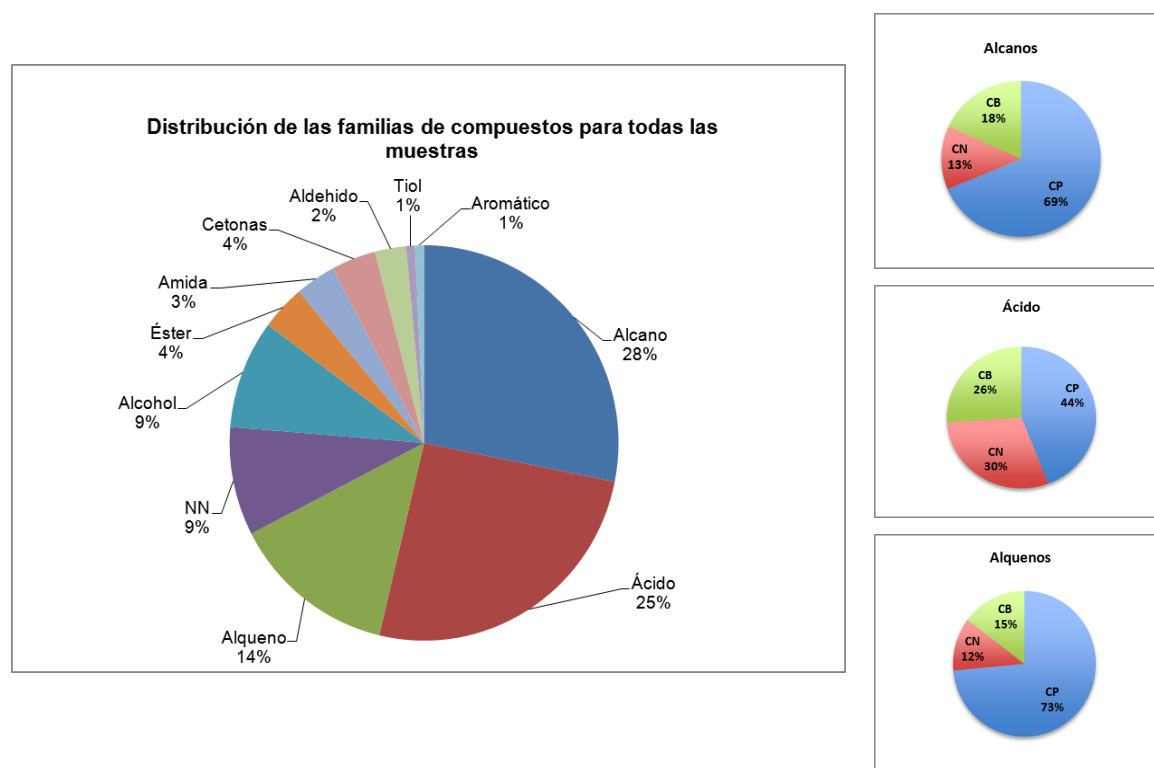
Nombre IUPAC	Formula
Ácido undecanoico	C ₁₁ H ₂₂ O ₂
Ácido (E)-octadec-13-enoico	C ₁₈ H ₃₄ O ₂
Ácido (4-oxo-1,2,3,6,7,12-hexahidroindolo-[2,3-a] quinolizin-12b-il) butanoico - 4	C ₁₉ H ₂₂ N ₂ O ₃
Ácido tetraenoico (5Z, 8Z, 11Z, 14Z) - eicosa -5, 8,11,14	C ₂₀ H ₃₂ O ₂
Ácido (Z)-icos-11-enoico	C ₂₀ H ₃₈ O ₂
Ácido (Z)-docos-13-enoico	C ₂₂ H ₄₂ O ₂
Ácido nonadecanoico	C ₁₉ H ₃₈ O ₂
3-Etil-3-metil heptano	C ₁₀ H ₂₂
10-Metil eicosane	C ₂₁ H ₄₄
Ciclo octacosane	C ₂₈ H ₅₆
3-Fluoro-4-[1-hidroxi-2-(propan-2-ilamino) etil] benceno -1 ,2-diol	C ₁₁ H ₁₆ FNO ₃
(E, 7R, 11R) 3,7,11,15-tetra metil hexadec-2-en-1-ol	C ₂₀ H ₄₀ O
Docosan-1-ol	C ₂₂ H ₄₆ O
(Z)-Pentacos-12-eno	C ₂₅ H ₅₀
Propan-2-il hexadecanoato	C ₁₉ H ₃₈ O ₂

En la Tabla 4- 3 y en el Anexo 2 se aprecia que hay una gran cantidad de compuestos que presentan tanto en los suelos hidrofóbicos como en los humectables, confirmándose las hipótesis planteadas por Jaramillo (2011), Doerr *et al.* (2005), Morley *et al.* (2005), y Jaramillo *et al.* (1997), que también encontraron este comportamiento en los suelos que trabajaron y concluyeron que ó los compuestos hidrofóbicos no estaban en la cantidad necesaria para inducir repelencia, ó que habían compuestos no hidrofóbicos que interferían con la manifestación de la hidrofobicidad de aquellos, ó que se presentaba una adsorción selectiva en el suelo de los compuestos repelentes que enmascaraba su hidrofobicidad.

Al agrupar los compuestos en familias (Figura 4- 5), se evidencia que los más abundantes son los alcanos, seguidos por los ácidos y los alquenos. Atanassova y Doerr (2010) y Morley *et al.* (2005), obtuvieron resultados similares al hacer una extracción en

suelos arenosos repelentes al agua con una mezcla de isopropanol – amoniaco 7:3 (v:v), donde las familias de compuestos más abundantes fueron ácidos grasos de cadena larga, alcanos y alquenos.

Figura 4- 5. Distribución de las familias de compuestos orgánicos presentes en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.



La abundancia de los compuestos que se presentaron en las principales familias (alcanos, ácidos y alquenos) se presentan en las Figuras 4- 6, 4- 7 y 4- 8.

Figura 4- 6. Contenido de los alcanos en suelos repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.

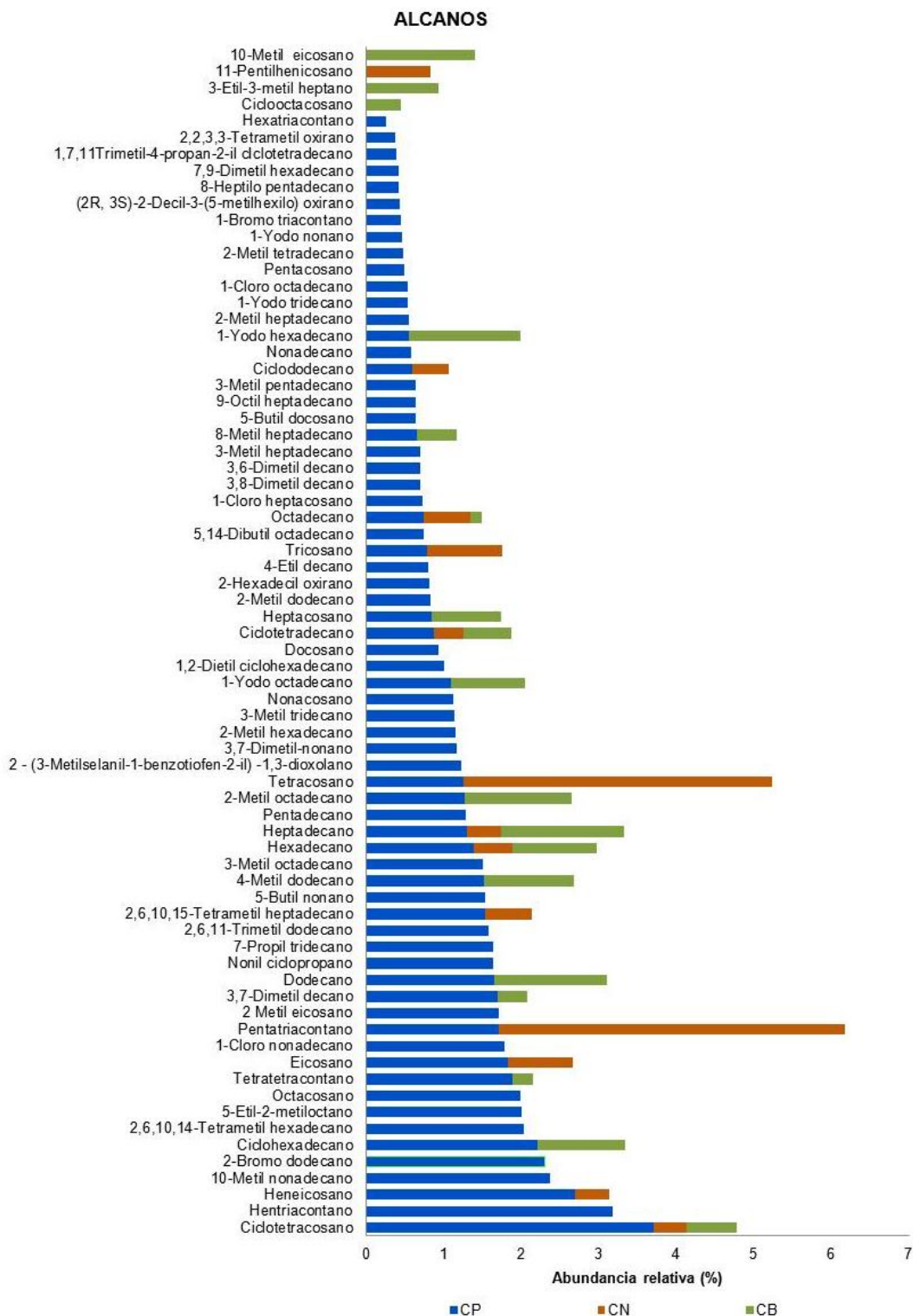


Figura 4- 7. Contenido de los ácidos en suelos repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.

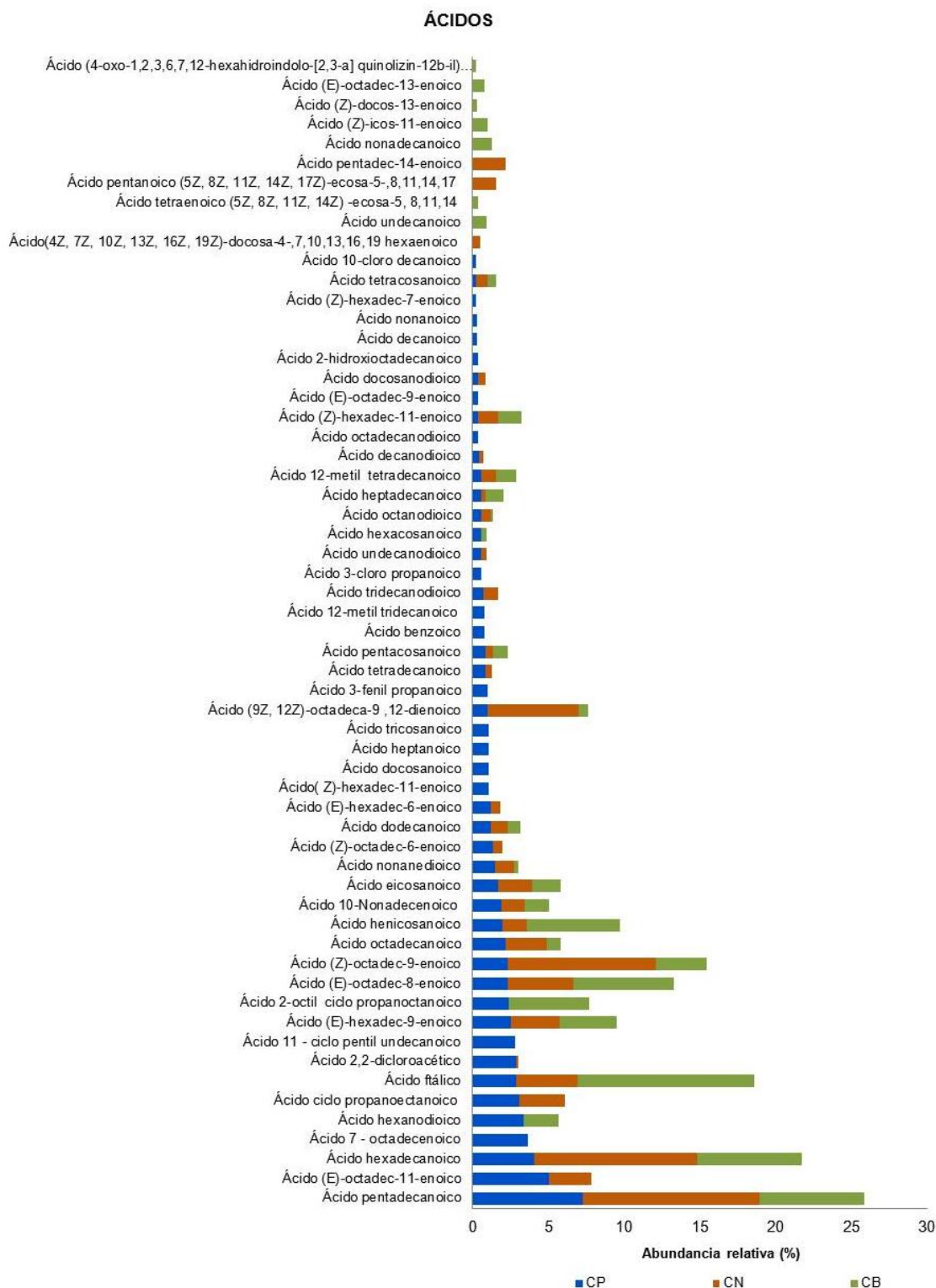
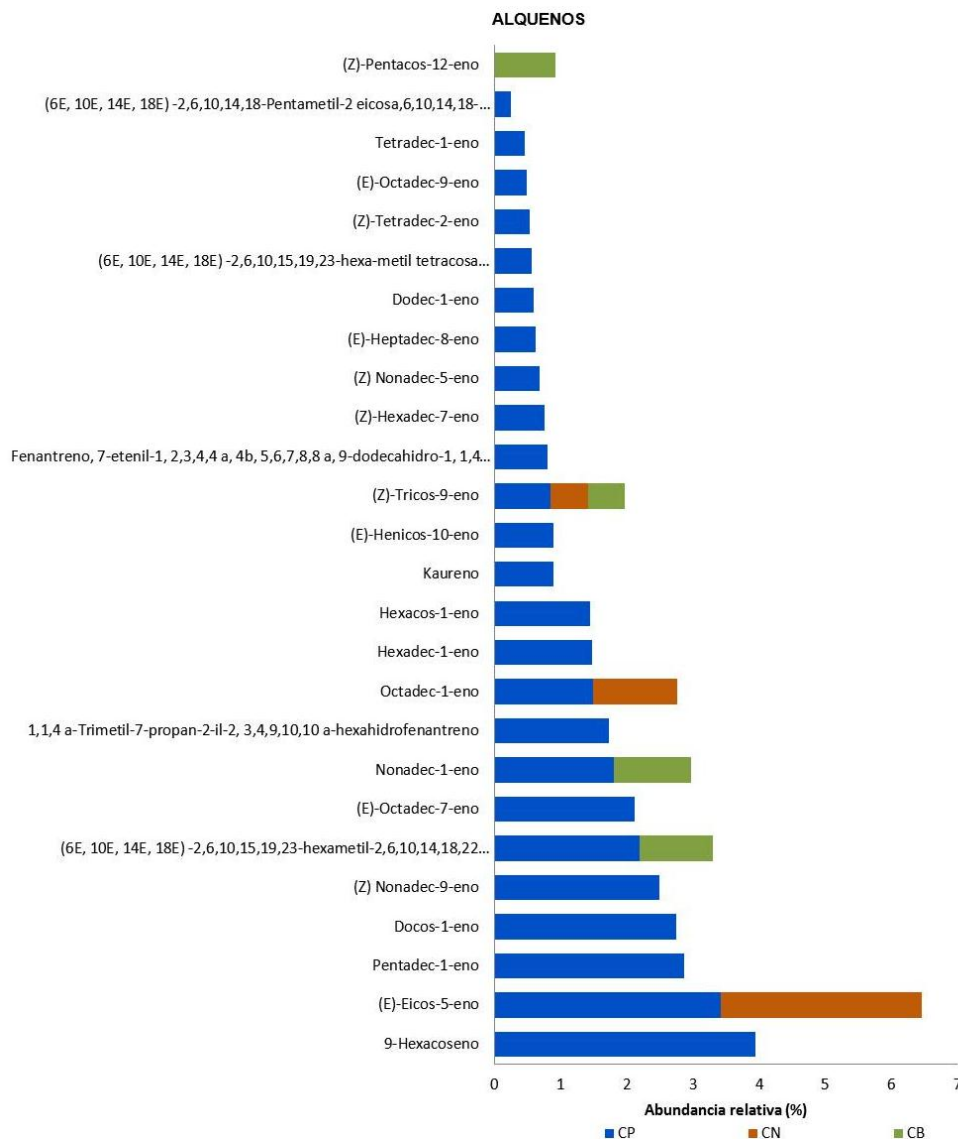


Figura 4- 8. Contenido de los alquenos en suelos repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.



Alcanos: En total se encontraron 72 alcanos de los cuales más del 60 % presentaron cadenas de entre 12 y 21 carbonos. Del total de los alcanos encontrados, 42 se presentaron únicamente en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*, uno en Andisoles bajo cobertura natural y 3 en muestras humectables (suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar). En la Figura 4- 6 se observa que los alcanos se presentaron en casi todos las muestras de Andisoles repelentes al agua bajo cobertura de *Pinus patula* y,

además, que los alcanos más abundantes (pentatriacontano y tetracosano) sólo estuvieron en Andisoles repelentes al agua.

El comportamiento de los alcanos implica que en esta familia de compuestos debe estar una buena parte de los responsables de la hidrofobicidad en los suelos y que su presencia en los suelos vérticos, sin generar repelencia al agua en ellos, confirma observaciones hechas por Jaramillo (2011) en el sentido que no es suficiente la presencia de los compuestos hidrofóbicos, sino que se deben dar interacciones con otros componentes del suelo para que la repelencia al agua se manifieste.

Ácidos: El 50 % de los ácidos identificados presentaron cadenas largas de carbono: C16, C18, C19, C20 y C22. Estos resultados concuerdan casi exactamente con los resultados de Mainwaring *et al.* (2004), en un estudio realizado en suelos de textura arenosa, con bajo contenido de arcilla, donde detectaron cadenas de ácidos grasos de C16, C18, C20, C21, C22, C23 y C24. De otra parte, Franco *et al.* (2000) encontraron, en extractos hidrofóbicos, la presencia de cadenas de ácidos grasos de C16 a C32, libres y esterificados.

En general, del total de los ácidos encontrados, el 45 % estuvo ausente en los suelos humectables. Se encontraron 7 ácidos que sólo estuvieron en suelos con propiedades vérticas y 3 en Andisoles bajo cobertura natural. Los ácidos más abundantes fueron el pentadecanoico y el hexadecanoico, y estuvieron en todas las muestras (Figura 4- 7). También en esta familia hay una alta cantidad de compuestos involucrados en la repelencia al agua del suelo.

Alquenos: El 76 % de los alquenos encontrados presentaron cadenas que variaron entre 14 y 30 carbonos. Todos los alquenos estuvieron presentes en los Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*, a excepción del (Z)-Pentacos-12-eno, que sólo se presentó en los suelos con propiedades vérticas. En general, se presentaron 26 alquenos, de los cuales 20 fueron exclusivos de Andisoles bajo cobertura de pino, 2 de Andisoles bajo cobertura de pino y natural y 2 de Andisoles bajo cobertura de pino y suelos vérticos del Carmen de Bolívar. Sólo el (Z) Tricos- 9 eno se presentó en los tres grupos de suelos estudiados. Esta familia de compuestos no ha sido muy relevante en otros estudios

similares a éste (Atanassova y Doerr, 2010; Hansel *et al.*, 2008; Doerr *et al.*, 2005; Morley *et al.*, 2005; Naafs *et al.*, 2004).

4.3.3 Análisis de correlación

Al llevar a cabo un análisis de correlación lineal entre todos los compuestos orgánicos extraídos y la severidad de la repelencia al agua con muestras secadas al aire antes y después de la extracción (PEa y PEad, respectivamente) y a 105 °C después de ella (PE105d), para todas las muestras de Andisoles, se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 4- 5.

Las correlaciones positivas entre algunos compuestos y la PEa pueden estar indicando que la cantidad de esos compuestos presente en el suelo ayudó a que se manifestara la repelencia al agua, sobre todo en la condición seca al aire antes de la extracción, donde los coeficientes de PEa son más altos que los de PEad.

Las correlaciones positivas después de la extracción sugieren que ésta tuvo algún efecto sobre la composición, la distribución y/o la orientación de los compuestos repelentes en el suelo (Jaramillo, 2011; Doerr *et al.*, 2000, 2005; Jaramillo *et al.*, 1997), o que se pudo presentar alguna interacción de éstos con otros que, siendo repelentes al agua, pudieron estar en cantidades insuficientes para que se expresara su carácter hidrofóbico en el suelo, es decir, lo que llamaron hidrofobicidad activa Jaramillo *et al.* (1997).

En las correlaciones con el PE105d se pudo haber presentado un efecto adicional al de la simple extracción, y es el efecto de la temperatura del secado a 105 °C, que también puede alterar la composición, distribución y/o orientación de los compuestos orgánicos del suelo (Jaramillo, 2003, 2011, Vanegas, 2003).

Los resultados obtenidos con estos análisis de correlación llevan a plantear las hipótesis que se han expresado en los párrafos anteriores, las cuales deben ser estudiadas más ampliamente en futuras investigaciones.

Tabla 4- 5 Coeficientes de correlación lineal significativos ($p < 0.05$) entre la severidad de la repelencia al agua y los compuestos orgánicos extraídos en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* y natural ($n = 24$).

Nombre IUPAC	PEa	PEad	PE105d
Ácido heptanoico	0.432	0.428	
Ácido decanodioico			
Ácido pentadec-14-enoico			
Ácido pentadecanoico			
Ácido (E)-hexadec-9-enoico		-0.460	-0.523
Ácido (Z)-hexadec-11-enoico			
Ácido (Z)-hexadec-11-enoico		0.600	
Ácido hexadecanoico			-0.435
Ácido (9Z, 12Z)-octadeca-9,12-dienoico			
Ácido (Z)-octadec-9-enoico			
Ácido (E)-octadec-8-enoico			
Ácido (E)-octadec-11-enoico			-0.410
Ácido (5Z, 8Z, 11Z, 14Z, 17Z)-eicosa-5-,8,11,14,17 pentaenoico			
Ácido (4Z, 7Z, 10Z, 13Z, 16Z, 19Z)-docosa-4-,7,10,13,16,19 hexaenoico			
Ácido Tetracosanoico			
Alcohol heptadecan-1-ol			0.408
2,6,10,15-tetrametil heptadecano		0.494	
Ciclotetracosano			0.471
1-Cloro heptacosano		0.600	
Pentatriacontano			
Alcohol nonadecan-1-ol	0.454		
Alcohol 2-Phenanthrenol, 4b, 5,6,7,8,8 a, 9,10-octahidro-4b,8,8-trimetil-1-(1-metiletil) -, (4bS-trans) -trimetil	0.544	0.431	0.486
(E)-heptadec-15-enal			
1,6-Dimetil naftaleno	0.432	0.428	
2 - (3-methylselanyl-1-benzotiofen-2-il) -1,3-dioxolano	0.468	0.522	0.409
1,6-Dimetil-4-propan-2-il naftaleno	0.432	0.428	
Nonadec-1-eno	0.463		
9-Hexacoseno		0.600	
Tetradecanamida		0.417	0.410
7-Hidroxi-1, 1,4 a-trimetil-8-propan-2-il-4, 9,10,10 a-tetrahidro-3H-fenantren-2-ona	0.432		
Metilo tetradecanoato			
6-Hidroxi-1, 1,4 a-trimetil-7-propan-2-il-3, 4,10,10 a-tetrahidro-2H-fenantren-9-ona	0.525		
Metil 3 - (6-formil-1 ,3-benzodioxol-5-il) benzoato de metilo	0.432	0.428	
Octadecil 2-metil prop-2-enoato			

4.4 Conclusiones

- El lavado de los suelos repelentes al agua con isopropanol - amoniaco, aunque produjo una reducción global de la hidrofobicidad en la mayoría de las muestras secadas al aire (PEa), no eliminó la repelencia al agua en ninguna de ellas.
- En los Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula* se extrajo la mayor cantidad de compuestos orgánicos (135), seguido de los Andisoles bajo cobertura natural (83) y por último los suelos con propiedades vérticas (73). En total se identificaron, en las 27 muestras analizadas, 256 compuestos orgánicos.
- Las principales familias de compuestos que se identificaron en los suelos repelentes al agua fueron: alcanos, ácidos y alquenos de cadenas largas.
- Se presentaron varios compuestos reconocidos como hidrofóbicos, tanto en suelos repelentes al agua, como en suelos humectables, confirmándose que la manifestación de la hidrofobicidad en el suelo requiere algo más que la sola presencia de los compuestos hidrofóbicos en él.

4.5 Bibliografía

- Atanassova, I. and S. Doerr. 2010. Organic compounds of different extractability in total solvent extracts from soils of contrasting water repellency. *European Journal of Soil Science*. 61, 298–313.
- Dekker, L. W. and C. J. Ritsema. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil. I. Potencial and actual water repellency. *Water Resour. Res.* 30 (9): 2507 – 2517.
- Doerr, S. H.; R. A. Shakesby and R. P. D. Walsh. 2000. Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. *Earth Sci. Rev.* 51: 33-65.
- Doerr, S. H.; C. T. Llewellyn.; P. Douglas.; C. P. Morley.; K. A. Mainwaring.; C. Haskins.; L. Johnsey.; C. J. Ritsema.; F. Stagnitti.; G. Allinson.; A. J. D. Ferreira.; J. J. Keizer.; A. K. Ziogas. and J. Diamantis. 2005. Extraction of compounds associated with water repellency in sandy soils of different origin S. *Australian Journal of soil Research*. 43: 225 - 237.

- Franco, C. M. M.; P. J. Clarke.; M. E. Tate and J. M. Oades. 2000. Hydrophobic properties and chemical characterization of natural water repellent materials in Australian sands. J. Hydrol. 231-232: 47-58.
- Giovannini, G. and S. Lucchesi. 1984. Differential thermal analysis and infrared investigations on soil hydrophobic substances. Soil Science. 137: 457-463.
- Hansel, A.; Cristiane T. Aoki.; Claudia M. B. F. Maia.; Anildo Cunha Jr. and Renato A. Dedecek. 2008. Comparison of two alkaline treatments in the extraction of organic compounds associated with water repellency in soil under *Pinus taeda*. Geoderma. 148. 167- 172.
- Horne, D. J. and J. C. McIntosh. 2000. Hydrophobic compounds in sands in New Zealand-extraction, characterization and proposed mechanisms for repellency expression. J. Hydrol. 231-232: 35-46.
- Jaramillo, D. F. 1996. Efecto de la extracción con solventes orgánicos en Andisoles repelentes al agua de Antioquia. Revista ICNE. 6 (1): 65 – 78.
- Jaramillo, J. D. F. 2000. Caracterización preliminar de los compuestos hidrofóbicos removidos de Andisoles repelentes al agua de Antioquia. Rev. Fac. Nal. Agr. Med. 53 (1): 801-821.
- Jaramillo, J. D. F. 2003. Efecto de la temperatura de secado del suelo sobre la repelencia al agua en Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Informe de investigación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 36 p.
- Jaramillo, J. D. F. 2006. Repelencia al agua en suelos. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 30 (115): 215 - 232.
- Jaramillo, J. D. F. 2011. Repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. Serie techné 213 p.
- Jaramillo, J. D. F. y H. Vanegas. 2007. Efecto de la temperatura de secado sobre el grado y la variabilidad espacial de la repelencia al agua en Andisoles de Antioquia, Colombia. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 60 (2): 4025 – 4035.
- Jaramillo, J. D. F.; C. Ortiz.; C. Peláez.; R. Zapata y C. Uribe. 1997. Extracción de sustancias hidrofóbicas Andisoles repelentes al agua del oriente antioqueño, con solventes polares. Rev. Fac. Nal. Agr. Med. 50 (2): 19-43.
- Li, C. Y. 1972. Soil fatty acids under Alder, Conifer, and mixed Alder- conifer stands of coastal Oregon. Soil Science. 125 (2): 92- 94.

- Llewellyn, C. T.; S. H. Doerr.; P. Douglas.; C. P. Morley and K. A. Mainwaring. 2004. Soxhlet extraction of organic compounds associated with soil water repellency. *Environ Chem Lett.* 2:41–44.
- Ma'shum, M.; M. E. Tate.; G. P. Jones. and J. M. Oades. 1988. Extraction and characterization of water repellent materials from Australian soils. *Journal of Soil Science.* 39: 99 - 110.
- Mainwaring, K. A.; P. M. Christopher.; S. H. Doerr.; P. Douglas.; C. T. Llewellyn.; G. Llewellyn.; I. Matthews and B. K. Stein. 2004. Role of heavy polar organic compounds for water repellency of sandy soils. *Environ Chem Lett.* 2:35–39.
- Morley, C. P.; K. A. Mainwaring.; S. H. Doerr.; P. Douglas.; C. T. Llewellyn and L. W. Dekker. 2005. Organic compounds at different depths in a sandy soil and their role in water repellency. *Australian Journal of Soil Research.* 43 (3) 239–249.
- Naafs, F. W.; Pim F. van Bergen.; Steven J. Boogert. and Jan W. de Leeuw. 2004. Solvent – extractable lipids in an acid andic forest soil: variations with depth and season. *Soil biology and Biochemistry.* 36: 297-308
- Poulenard, J.; J. C. Michel.; F. Bartoli.; J. M. Portal and P. Podwojewski. 2004. Water repellency of volcanic ash soils from Ecuadorian páramo: effect of water content and characteristics of hydrophobic organic matter. . *European Journal of Soil Science.* (55) 487–496.
- Roy, J. L.; W. B. McGill and M. D. Rawluk. 1999. Petroleum residues as water-repellent substances in weathered nonwetable oil contaminated soil. *Can. J. Soil Sci.* 79: 367-380.
- Senesi, N.; C. Testini and M. Polemio. 1893. Chemical and spectroscopic characterization of soil organic matter fractions isolated by sequential extraction procedure. *Journal of Soil Science.* 34: 801-813.
- Vanegas, V. H. A. 2003. Efecto de la temperatura de secado de Andisoles bajo dos coberturas vegetales sobre el grado de hidrofobicidad que desarrollan. Trabajo de Grado Ingeniero Forestal. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 61 p.

5. Actividad microbiológica en Andisoles repelentes al agua.

5.1 Introducción

En términos generales, los microorganismos del suelo son entidades que influyen en varios aspectos del mismo y cada uno desempeña diferentes actividades en él. De particular interés son aquellos microorganismos involucrados en la descomposición de la materia orgánica y en el ciclo de los nutrientes. Así, en muchos casos, los microorganismos del suelo pueden determinar la disponibilidad de nutrientes y por eso son considerados herramientas para el manejo de aquel y de la nutrición de la planta (Osorio, 2010).

La habilidad de los microorganismos para degradar contaminantes es fundamental para la salud y la fertilidad del suelo, y uno de los principales mecanismos que ayuda a remover contaminantes orgánicos hidrofóbicos del mismo es la actividad catabólica de sus microorganismos (Semple *et al.*, 2003).

La repelencia al agua en los suelos se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos en él. Las principales fuentes de dichos compuestos son los vegetales y los microorganismos, tanto vivos como en descomposición (Jaramillo, 2011).

Ambler *et al.* (1989) sostienen que en suelos microbiológicamente activos, los lípidos son rápidamente descompuestos, siendo mayor la biodegradación de compuestos de cadena corta. Anotan, además, que en suelos ácidos y/o hidromórficos la descomposición de los lípidos es muy lenta por lo que se acumulan, en consecuencia, compuestos hidrofóbicos en él.

Según información recopilada por Jaramillo (2011), los microorganismos que se han encontrado produciendo repelencia al agua en el suelo son hongos pertenecientes a más de 60 especies de la clase Basidiomycetes, siendo reportados en la literatura, con mayor frecuencia, las especies *Amanita muscaria*, *Amanita vaginata*, *Aspergillus sydowi*, *Cortinarius sp*, *Fusarium sp*, *Lactarius deliciosus*, *Marasmius oreades*, *Penicillium nigricans*, *Piloderma bicolor*, *Rhizopogon vinicolor*, *Russula sp* y *Trichoderma sp*.

McKenna *et al.* (2002) encontraron, en suelos arenosos repelentes al agua de Australia, 10 actinomicetos: 3 streptomicetos y 7 no-streptomicetos, capaces de utilizar cera de abejas como única fuente de C en un medio de crecimiento de agar. Sostienen que el bajo número de microorganismos aislados utilizando cera indica que las ceras son los compuestos de la materia orgánica del suelo más resistentes a la degradación por microorganismos.

Roper (2004) aisló de varias fuentes que incluyeron suelos arenosos no humectables de Australia, 67 bacterias capaces de degradar ceras, aunque sólo pudo conservar 37 en cultivos estables en laboratorio. De estas 37, 19 fueron actinomicetos de los géneros *Rhodococcus spp.*, *Mycobacterium spp.*, *Streptomyces spp.* y *Nocardia spp.* Se observó que estos microorganismos produjeron biosurfactantes que redujeron la tensión superficial del medio de crecimiento. *Rhodococcus spp.* fue el organismo que produjo una mayor reducción en la repelencia al agua en suelos inoculados con él, probablemente por ser capaz de metabolizar ceras.

Franco *et al.* (2000) y Roper (2006), en estudios de laboratorio, invernadero y campo, encontraron que la actividad degradadora de ceras, por parte de actinomicetos, en suelos repelentes al agua, y su consiguiente mejoramiento en la humectabilidad, se podía incrementar mediante la aplicación de fertilizantes, compost, cal y riego a los suelos. A pesar de estos resultados, Roper (2006) concluye que si el proceso se hace con inóculos aislados en laboratorio que luego sean llevados al campo, se pueden obtener relaciones costo/beneficio negativas, por lo que recomienda que es mejor hacer prácticas de manejo que estimulen el desarrollo de poblaciones nativas del suelo capaces de degradar ceras causantes de hidrofobicidad en él.

Hallet *et al.* (2006) inocularon, en laboratorio, núcleos de suelo contaminados con antraceno, un hidrocarburo aromático policíclico hidrofóbico, con tres especies de basidiomicetos para estudiar el efecto que ellos producían sobre la repelencia al agua, y encontraron que sólo la especie *Coriolus versicolor*, después de un periodo de incubación de 28 días, redujo significativamente la repelencia del suelo, aunque a profundidades no mayores a 20 mm.

Los organismos del suelo producen enzimas que son proteínas especializadas que actúan sobre un sustrato, catalizando las reacciones químicas que se dan en una célula. Estas son producidas principalmente por microorganismos como bacterias, hongos y protozoarios, o son de origen animal o vegetal: raíces, residuos de plantas, residuos de tracto digestivo de meso y macrofauna del suelo (Gianfrenda y Bollag, 1996).

Una parte de las enzimas del suelo son extracelulares, liberadas durante el metabolismo y muerte celular aunque, por lo regular, su vida media como enzimas libres es muy corta; otras son intracelulares, formando parte de la biomasa microbiana. Y por último, existen las enzimas inmovilizadas que son las que pueden mantener un nivel constante y estable de actividad enzimática en el suelo, independiente de la proliferación microbiana y de las formas usuales de regulación

de la síntesis y secreción de enzimas. Este tipo de enzimas inmovilizadas pueden permanecer unidas a coloides minerales (como la arcilla) u orgánicos (como las sustancias húmicas), y son muy resistentes a procesos de desnaturalización. Todo ello indica que es difícil extraer la totalidad de la actividad enzimática existente en el suelo y es por ello que se estudian indirectamente midiendo su actividad (García *et al.*, 2003).

Los microorganismos son los mayores productores de enzimas en el suelo (Burns, 1978), por lo que conociendo la actividad de una determinada enzima, producida por una cantidad de sustrato en un tiempo determinado, se puede estimar la importancia de ciertos grupos de microorganismos en el suelo que la están produciendo.

La determinación de la actividad enzimática en el suelo es importante para conocer su funcionamiento ya que las enzimas determinan gran parte de las transformaciones químicas que se producen en él. (Stryer, 1995, citado por García *et al.*, 2003). A pesar de que las medidas realizadas sobre las actividades enzimáticas se consideran medidas potenciales, ya que se miden “in vitro” bajo condiciones óptimas de temperatura y pH (Narvaez, 2008), la actividad enzimática juega un papel clave en el funcionamiento bioquímico del suelo, incluyendo la formación y degradación de la materia orgánica, los ciclos de los nutrientes y la descomposición de los xenobióticos (Acosta *et al.*, 2007).

Las enzimas del suelo pueden considerarse útiles para monitorizar cambios en las actividades microbianas y ofrecen información sobre la capacidad potencial del suelo para llevar a cabo reacciones específicas, las cuales son importantes en el ciclo de nutrientes como C, N, P y S, pudiendo aportar información clave sobre aspectos relacionados con la calidad de los suelos (García y Hernández, 2000).

Los ciclos de los nutrientes en el suelo implican una serie de reacciones bioquímicas, químicas y fisicoquímicas que están mediadas por enzimas y en las

que está implícita la acción que ejercen los microorganismos, las raíces y los animales del suelo (Tabatabai, 1994 citado por Narvaez, 2008).

Las esterasas son enzimas del suelo sintetizadas por bacterias y hongos, que cumplen un rol importante en la remoción de grupos desde el sustrato mediante hidrólisis del enlace éster, catalizando reacciones de hidrólisis en proteínas, polipéptidos, lípidos y fosfolípidos (Zahir *et al.*, 2001). Así, esterasas no específicas como proteasas y lipasas están implicadas en la descomposición de muchos tipos de tejidos en el suelo (Adam y Duncan, 2001) y por lo tanto participan activamente en la degradación de la materia orgánica (Nannipieri *et al.*, 2003). Si se considera que más de 90% del flujo de energía en el suelo pasa a través de la microflora y que los microorganismos heterótrofos son predominantes, la actividad de la esterasa estará estrechamente relacionada con la actividad microbiológica total del suelo (Adam y Duncan, 2001; Green *et al.*, 2006).

Otra de las enzimas evaluadas en el suelo, debido a su participación en la dinámica de uno de los nutrientes más importantes para las plantas, es la fosfatasa, la cual designa un amplio grupo de enzimas que catalizan la hidrólisis de ésteres y anhídridos del ácido fosfórico. Las más estudiadas son las fosfomonoesterasas ácidas ó alcalinas. Las ácidas son producidas por los microorganismos y las raíces de las plantas, mientras que las alcalinas son producidas principalmente por microorganismos (Eivazi y Tabatabai, 1977; Speir y Ross, 1978).

En este capítulo se pretende caracterizar la actividad microbiológica global y enzimática, así como los principales grupos funcionales de microorganismos viables (hongos y bacterias), en Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, bajo cobertura de *Pinus patula* y de rastrojo natural, y establecer si existe alguna relación entre ellos y la severidad de la repelencia al agua en dichos suelos.

5.2 Materiales y métodos

5.2.1 Caracterización del sitio experimental y muestreo

La caracterización del sitio experimental y del muestreo se detalló en los numerales 1.2.1. y 1.2.2.

5.2.2 Procedimiento

5.2.2.1. Determinación de grupos funcionales

Para la determinación de los diferentes grupos funcionales de microorganismos del suelo: Celulolíticos (CEL), Proteolíticos (PROT), bacterias fijadoras de nitrógeno (BFN), microorganismos solubilizadores de fósforo (MSP) y degradadores de lípidos (DL), se tomaron aproximadamente 20 g de la submuestra separada para este efecto (ver numeral 1.2.2) y se llevaron al laboratorio del Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares (GIEM) de la Universidad de Antioquia, donde se procesaron.

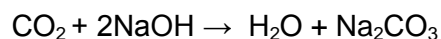
Los medios de cultivo empleados para cada uno de los grupos funcionales se presentan en la Tabla 5- 1. Una vez preparados los medios se esterilizaron en autoclave a 120 °C y 0.1 MPa, por 30 min.

Para determinar la abundancia de microorganismos del suelo en los grupos funcionales CEL, PROT, BFN, MSP y DL en el laboratorio, se tomaron 10 g de suelo (base seca) pasados por un tamiz de 2 mm, se mezclaron con 90 mL de agua destilada y se agitaron manualmente durante 5 min: así se constituyó la dilución 10^{-1} . De ésta primera dilución se tomó 1 mL, con una pipeta estéril, y se añadió a un tubo de ensayo con 9 mL de agua estéril, constituyéndose en la dilución de 10^{-2} ; este procedimiento se repitió hasta obtener la dilución de 10^{-4} . Luego, 100 μ L de las diluciones 10^{-2} y 10^{-4} se transfirieron y distribuyeron asépticamente, por duplicado,

sobre la superficie de los medios de cultivo selectivos estériles contenidos en cajas de petri. Las cajas inoculadas se incubaron a 28 °C y después de un periodo que fluctuó entre 3 - 8 días, se realizaron los conteos de las unidades formadoras de colonias (UFC) visibles que formaban halos a su alrededor.

▪ 5.2.2.2. Respirimetría del suelo

Siguiendo el método de Zibilske (1994), se pesaron 20 g de suelo y se transfirieron a un recipiente de vidrio donde se procedió a humedecerlos con agua destilada hasta capacidad de campo, aproximadamente. Dentro del recipiente de vidrio se dispuso un beaker que contenía 20 mL de una solución de NaOH 0.1 M que actuó como trampa para el CO₂. El recipiente de vidrio se selló herméticamente y se incubó en la oscuridad durante 48 horas a temperatura ambiente. Una vez terminada la incubación, se realizó una titulación con HCl 1 M en presencia de fenolftaleína como indicador. Con estos datos se calculó la cantidad de CO₂ producido. La reacción del CO₂ en este sistema se ilustra a continuación:



▪ 5.2.2.3. Hidrólisis de diacetato de fluoresceína (FDA)

Para la determinación de la hidrólisis del FDA se utilizó una variación de la metodología descrita por Inbar *et al.* (1991): a 0,5 g de suelo liofilizado se le adicionaron 20 mL de buffer fosfato pH 7.6 estéril y 400 µL de solución stock de FDA, la cual se preparó en acetona, con una concentración de 20 mg/mL. Paralelamente se preparó un blanco sin suelo.

Tabla 5- 1 Composición* de los medios de cultivo selectivos para aislar microorganismos en grupos funcionales.

Celulolíticos Wood (1980)	Proteolíticos Matsumoto <i>et al.</i> (2005)	Bacterias fijadoras de Nitrógeno Döbereiner y Day (1976)	Solubilizadores de fósforo Osorio y Habte (2001)	Degradadores de lípidos Ko <i>et al.</i> (2005)
Carboximetil celulosa 5 NH ₄ NO ₃ 1 Solución Salina (0.85%) 50 (mL) Agar-Agar 15	Caseína 10 Extracto de levadura 0.1 KH ₂ PO ₄ 1.5 MgSO ₄ .7H ₂ O 0.5 Solución Salina (0.85%) 50 (mL) Agar-Agar 15	KH ₂ PO ₄ 0.4 K ₂ HPO ₄ 0.1 MgSO ₄ .7H ₂ O 0.2 NaCl 0.1 CaCl ₂ 0.02 FeCl ₃ 0.01 MoO ₄ Na.2H ₂ O 0.002 Acido málico 5 Azul de Bromotimol 5 (mL) Agar-Agar 15	NaCl 1 CaCl ₂ .2H ₂ O 0.2 MgSO ₄ .7H ₂ O 0.4 NH ₄ NO ₃ 1 Glucosa 10 Agar-Agar 15 Roca fosfórica 2	Urea 0.02 Cal agrícola 0.2 Aceite de girasol 1 Tween 80** 0.1 (mL) Agar-Agar 15 (mL)

* Cantidades de sólidos en g /L.

**Tween 80: Es un surfactante hidrofílico. Se utiliza para la emulsión de aceite en agua y para la dispersión o solubilización de aceites.

Las muestras y los blancos se llevaron a una incubadora STABIL-THERM a 30°C y se dejaron en oscuridad durante una hora, al cabo de la cual se adicionaron 20 mL de acetona a la muestra, se agitó, se filtró en balones volumétricos de 50 mL, se aforó el volumen con solución buffer y se midió la fluoresceína generada mediante cromatografía líquida de alta resolución - HPLC.

Para el seguimiento de la fluoresceína por cromatografía líquida se utilizó un HPLC GILSON (sistema cuaternario), con un detector de arreglo de diodos-DAD acoplado. La separación se realizó en una columna de fase reversa. Se utilizó un corrido isocrático de Acetonitrilo: Agua, 70:30. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

▪ 5.2.2.4. Fosfatasa Alcalina

La actividad de la fosfatasa alcalina se determinó siguiendo el método descrito por Tabatabai (1994), pero sin la incorporación de tolueno. De cada muestra se tomaron dos porciones de suelo liofilizado de 1 g y se colocaron, cada una en un vial, se le adicionaron 700 µL de p-nitrofenil fosfato 0.01 M a cada vial y se taparon e incubaron, uno durante 10 minutos y el otro durante 20 minutos. Pasado el periodo de incubación se añadieron 250 µL de CaCl_2 1 M y 500 µL de NaOH 2 M para detener la reacción. Una vez parada la reacción las muestras fueron centrifugadas a 3500 rpm durante 1 minuto. Posteriormente se tomaron 100 µL del sobrenadante y se mezclaron con 2000 µL de agua deionizada y se leyó la absorbancia a 450 nm en espectrofotómetro.

En el sobrenadante resultante se determinó la concentración de p-nitrofenol (p-NF) en nM (p-NF) $\text{g}^{-1} \text{min}^{-1}$, utilizando una curva patrón de calibración construida con cantidades conocidas de p-nitrofenol. Todas las determinaciones se realizaron por duplicado.

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Caracterización de la actividad microbiológica

Para el análisis de los grupos funcionales, en vista de que la cantidad de colonias en las 2 diluciones utilizadas (10^{-2} y 10^{-4} sembradas por duplicado) fue tan baja, se utilizaron los cuatro conteos hechos para establecer el promedio de colonias desarrolladas en cada tratamiento. Este promedio luego se transformó a logaritmo, con el fin de facilitar la interpretación de los resultados.

En las Tabla 5- 2, 5- 3 y 5- 4 se presentan algunos de los estadísticos básicos de la actividad microbiológica y enzimática en Andisoles repelentes al agua de la parte central de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, y de algunos suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar.

Tabla 5- 2 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la actividad microbiológica en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* (n =22).

Variables* *	Promedio	Mediana	DE	CV (%)	Min	Max	Q1	Q3	Sesgo
FDA	34.22	31.83	31.65	92.48	0.00	103.39	7.14	61.46	0.91
Fosfatasa	15.23	13.49	12.07	79.21	0.00	38.16	5.87	21.20	1.10
Respirometría	0.42	0.41	0.12	28.36	0.22	0.60	0.30	0.53	-0.08
Log CEL	3.06	3.42	0.88	28.87	1.40	4.26	2.24	3.88	-0.97
Log PROT	0.55	0.00	0.75	136.37	0.00	1.70	0.00	1.40	1.26
Log BFN	0.56	0.00	0.78	138.89	0.00	2.24	0.00	1.40	1.55
Log DL	4.68	4.97	1.87	39.94	1.40	7.31	2.57	6.35	-0.88
Log MSP	1.30	1.55	1.24	95.49	0.00	3.95	0.00	2.30	0.66

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Min: Valor mínimo. Max: Valor máximo. Q1: Cuartil inferior. Q3: Cuartil superior.

** FDA: hidrólisis de diacetato de fluoresceína (mg FDA/kg suelo). Log CEL: logaritmo de UFC/g de suelo de celulolíticos. Log PROT: logaritmo de UFC/g de suelo de proteolíticos. Log BFN: logaritmo de UFC/g de suelo de bacterias fijadoras de nitrógeno. Log DL: logaritmo de UFC/g de suelo de degradadores de lípidos. Log MSP: logaritmo de UFC/g de suelo de microorganismos solubilizadores de fósforo.

Casi todas las variables estudiadas en los Andisoles de Piedras Blancas (Tabla 5- 2, y 5- 3), presentaron una alta variabilidad, reflejada en los coeficientes de variación altos y en la amplitud de los rangos de valores que ellas exhibieron.

La alta variabilidad en estas propiedades ha sido observada por muchos investigadores quienes la han atribuido a la gran cantidad de factores que las afectan como pH, temperatura, salinidad, contenido de carbono y de nutrientes, humedad, concentración de las enzimas, presencia de coenzimas y de inhibidores para la actividad enzimática y microbiológica, aparte del uso y manejo que se le dé al suelo (Zahir, *et al.* 2001; Blasco, 2002; García *et al.*, 2003; Sylvia *et al.* 2005; Kandeler, 2007; León, 2008). La variabilidad observada en los suelos del Carmen de Bolívar fue mucho menor que la de los Andisoles.

Tabla 5- 3 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la actividad microbiológica en Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura natural (n=3)

Variables* *	Promedio	DE	CV (%)	Min	Max
FDA	31.49	28.54	90.63	0.00	55.65
Fosfatasa	20.73	10.59	51.09	12.65	32.72
Respirometría	0.55	0.07	12.45	0.47	0.60
Log CEL	2.45	1.81	74.10	1.40	4.54
Log PROT	3.74	2.04	54.46	1.40	5.11
Log BFN	2.94	2.15	73.05	1.70	5.42
Log DL	3.00	1.98	65.77	1.40	5.21
Log MSP	4.36	2.35	53.83	1.70	6.14

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Min: Valor mínimo. Max: Valor máximo.

** FDA: hidrólisis de diacetato de fluoresceína (mg FDA/kg suelo). Log CEL: logaritmo de UFC/g de suelo de celulolíticos. Log PROT: logaritmo de UFC/g de suelo de proteolíticos. Log BFN: logaritmo de UFC/g de suelo de bacterias fijadoras de nitrógeno. Log DL: logaritmo de UFC/g de suelo de degradadores de lípidos. Log MSP: logaritmo de UFC/g de suelo de microorganismos solubilizadores de fósforo.

Los valores promedios de la FDA en Andisoles de Piedras Blancas (Tabla 5- 2 y 5- 3) estuvieron por encima de los reportados por Pérez (2001) y Castillo (2002) para suelos agrícolas (15,5 y 74,5 2 mg de FDA/ kg de suelo, respectivamente) y de los reportados por Solange (2007) para Andisoles humectables (29.45 mg de FDA/ kg de suelo), mientras que los obtenidos en los suelos vérticos fueron menores (Tabla 5- 4).

Al comparar la actividad enzimática de la FDA y la fosfatasa alcalina (Figura 5- 1), se observa un comportamiento muy similar en ellas, debido a que ambas actividades están midiéndolo, en términos generales, la actividad total del suelo. La presencia de mayor actividad enzimática en los Andisoles, con respecto a los suelos vérticos, puede estar

relacionada con el hecho de que en los Andisoles hay mayor cantidad de coloides activos en la inmovilización de las enzimas, las cuales pueden ser reutilizadas (Zahir *et al.*, 2001) y, por tanto, tendrían mayor presencia en las evaluaciones hechas en dichos suelos.

Figura 5- 1 Actividades enzimáticas (a) FDA y (b) Fosfatasa alcalina en Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos vérticos del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana.

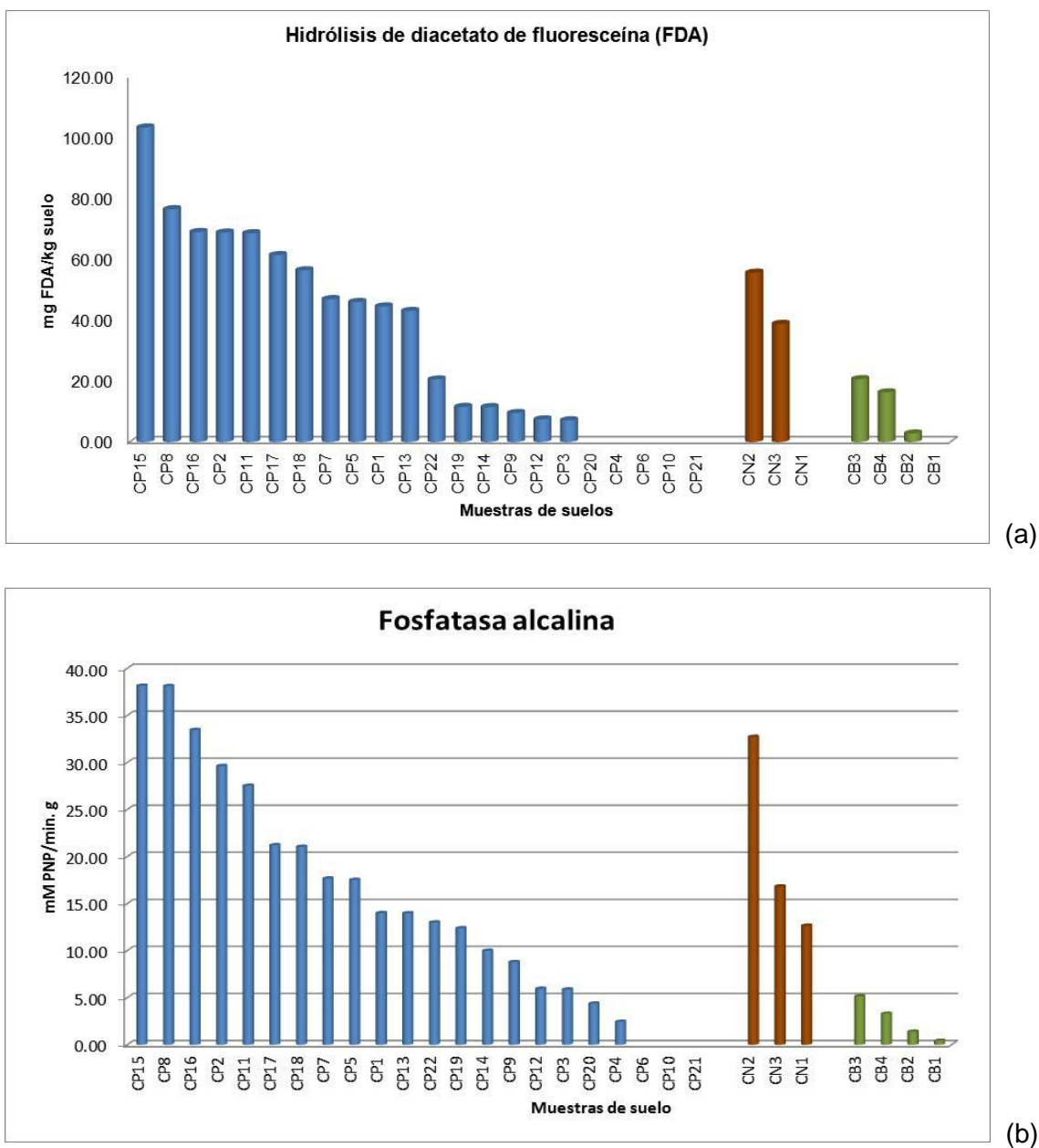


Tabla 5- 4 Estadísticos* básicos de algunas propiedades relacionadas con la actividad microbiológica en suelos vérticos del Carmen de Bolívar (n=4)

Variables* *	Promedio	DE	CV (%)	Min	Max
FDA	13.28	9.31	70.15	2.82	20.68
Fosfatasa	2.56	2.09	81.74	0.42	5.14
Respirometría	0.54	0.12	22.86	0.43	0.68
Log CEL	2.16	1.39	64.20	0.40	3.31
Log PROT	2.31	0.30	12.92	1.99	2.65
Log BFN	3.00	0.64	21.20	2.32	3.67
Log DL	3.44	0.63	18.40	2.62	4.15
Log MSP	2.69	0.55	20.58	2.18	3.21

* DE: Desviación Estándar. CV: Coeficiente de variación. Min: Valor mínimo. Max: Valor máximo.

** FDA: hidrólisis de diacetato de fluoresceína (mg FDA/kg suelo). Log CEL: logaritmo de UFC/g de suelo de celulolíticos. Log PROT: logaritmo de UFC/g de suelo de proteolíticos. Log BFN: logaritmo de UFC/g de suelo de bacterias fijadoras de nitrógeno. Log DL: logaritmo de UFC/g de suelo de degradadores de lípidos. Log MSP: logaritmo de UFC/g de suelo de microorganismos solubilizadores de fósforo.

Los valores promedios de la respirometría para todos los suelos estudiados fueron bajos, y los menores se presentaron bajo la cobertura de *Pinus patula*, lo que concuerda con lo encontrado por Raich y Tufekcioglu (2000), quienes encontraron una menor tasa de respiración en un suelo bajo bosque de coníferas que en el mismo suelo en bosque de hojas anchas.

Así mismo, se presentó un bajo contenido de grupos funcionales de microorganismos, sobre todo en los Andisoles bajo cobertura de *Pinus patula*. Es notable que el 50 % de las muestras no presentó microorganismos proteolíticos ni bacterias fijadoras de nitrógeno, y que el 25 % de ellas no presentó microorganismos solubilizadores de fósforo (Tabla 5- 2). Este comportamiento puede estar ratificando observaciones de Frioni (1999), Duarte et al. (2003), Sylvia et al. (2005) y de muchos otros investigadores citados por Zahir et al. (2001), en el sentido de que la calidad de la materia orgánica del suelo y su estado nutricional son factores importantes que controlan las poblaciones y la actividad de los microorganismos del suelo y, como se mostró en las partes 2 y 3 de este trabajo, en los Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, el nivel de fertilidad y la calidad de sus componente orgánico son bajos.

La actividad específica de los microorganismos en los suelos vérticos se puede estar viendo afectada por el contenido de materia orgánica y, sobre todo, por el desbalance nutricional que presenta dicho suelo, principalmente entre las bases.

A pesar de que los microorganismos solubilizadores de fósforo, presentaron valores promedios muy variables en todos los suelos, en los Andisoles bajo cobertura natural se presentaron valores similares a los propuestos por Adame (1996) citado por Linares (1999), quien estableció como niveles adecuados para la población de estos microorganismos valores entre 3.19 y 3.23.

5.3.2 Análisis de correlación

En la Tabla 5- 5 se presentan los coeficientes de correlación lineal significativos ($p < 0.05$) entre las diferentes formas de actividad microbial y algunas propiedades básicas de los Andisoles de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas.

Como se puede observar en la Tabla 5- 5, se presentaron pocas correlaciones significativas, y muchas de ellas con coeficientes bajos que al transformarlos en coeficientes de determinación R^2 , explican un porcentaje muy bajo de la variabilidad en las variables analizadas.

Llaman la atención en este análisis varios hechos:

- No hay correlación entre la actividad microbiológica global del suelo (FDA, fosfatasa y respirometría), y casi ninguna entre ellas y otras propiedades edáficas. La correlación negativa y significativa entre la respirometría y los contenidos de Alo y Feo sugiere un efecto depresivo en la actividad microbiológica por parte de los elementos que más controlan la actividad química en los Andisoles.
- La ausencia de correlación entre el componente microbiológico del suelo y la repelencia al agua en suelo seco al aire.
- El efecto positivo que tienen los elementos nutricionales de las plantas (Ca, Mg, P, Fe) sobre la población de microorganismos proteolíticos, y del Ca, Mg y Fe en la solubilizadores de fósforo. Estos efectos han sido reportados por Duarte *et al.* (2003) y Osorio (2009).

Tabla 5- 5 Coeficientes de correlación lineal significativos ($p < 0.05$) entre indicadores de actividad microbiológica y algunas propiedades de los Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula* y natural ($n = 24$)

	FDA	Respirometría	Log PROT	Log BFN	Log MSP	Log CEL
Log PROT				0.6997	0.7837	
Log BFN					0.6388	
PE105			-0.5438	-0.4965	-0.4855	
Ca			0.7234		0.5379	
Mg			0.6735		0.4987	
P			0.5642			
Fe			0.6012		0.429	
Alo		-0.4852		-0.4059		
Fep			0.677	0.6483	0.5127	
Alo + 0.5 Feo		-0.4692		-0.4073		
Alp/Alo				0.5598		
IM			-0.5827		-0.4358	
Dlogk			-0.5429	-0.4189	-0.4542	
E4/E6			-0.5451		-0.4185	
6-hidroxi-1, 1,4 a- trimetil-7-propan-2-il-3, 4,10,10 a-tetrahidro- 2H-fenantren-9-ona						0.4131
Ciclotetracosano	-0.4385					
Ácido pentadec_14_enoico			0.5641	0.7713	0.5565	
(E)-hexadec-9-enoico				0.5084		
(Z)-hexadec-11-enoico			0.5075	0.708	0.4796	
Ácido hexadecanoico			0.6007	0.4246	0.5899	
(E)-octadec-8-enoico			0.6369	0.5564	0.6176	
Ácido tetracosanoico			0.5798	0.8127	0.6141	
Pentatriacontano			0.4814	0.6765	0.4475	
(E)-heptadec-15-enal			0.4907		0.4416	
Octadecil 2_metil prop_2_enoato			0.5641	0.7713	0.5565	

- El efecto negativo del Alo y Feo sobre las bacterias fijadoras de nitrógeno.
- El efecto negativo de la calidad de la materia orgánica de estos suelos sobre los microorganismos proteolíticos, solubilizadores de fósforo y fijadores de nitrógeno, probablemente debido a la saturación que presenta aquella con Al.

- La poca cantidad de compuestos orgánicos específicos que se correlacionaron positivamente con los microorganismos proteolíticos, solubilizadores de fósforo y fijadores de nitrógeno.
- La ausencia de correlaciones entre los microorganismos celulolíticos y degradadores de grasas con todas las propiedades del suelo.

Las relaciones expuestas anteriormente pueden estar resaltando la baja calidad que tienen los Andisoles estudiados y su mínima capacidad de soportar una actividad microbial que ayude a mantener unos niveles de productividad y salud adecuados. En buena parte, el comportamiento observado puede explicar la alta acumulación de materia orgánica que se presenta en estos suelos, y su deficiente calidad.

5.4 Conclusiones

- La actividad global del suelo (FDA, fosfatasa y respirometría), para los Andisoles repelentes al agua de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, fue muy similar a la obtenida para los suelos humectables (suelos vérticos del Carmen de Bolívar).
- Se presentó, en general, en todos los suelos una cantidad muy baja de microorganismos por grupo funcional, probablemente debido a la calidad de la materia orgánica del suelo y al estado nutricional del suelo.
- No se presentó ninguna correlación significativa entre la actividad microbiológica y la repelencia al agua.

5.5 Bibliografía

- Acosta, M.; L. Cruz.; R. Sotomayor. and A. L Pérez. 2007. Enzyme activities as affected by soil properties and land use in a tropical watershed. *Applied Soil Ecology* 35–45
- Adam, G. and H. Duncan. 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. *Soil Biol. Biochem.* 33: 943-951.
- Amblès, A.; P. Magnoux; P. Jambu; R. Jacques and E. Fustec. 1989. Effects of addition of bentonite on the hydrocarbon fraction of a podzol soil (A1 Horizon). *J. Soil Sci.* 40: 685-694.
- Blasco, M. 2002. Enzimas: una aproximación didáctica. *Suelos Ecuatoriales*. 32 (2): 157 - 171.
- Burns, R. 1978. Enzyme activity in soil: Some theoretical and practical considerations. En Burns, R.G. (Ed.), *Soil enzymes*. Academic Press, London. 241p.
- Castillo, A. 2002. Efectos de distintas datas de fertilización orgánica sobre las actividades biológicas en un suelo transicional manejado bajo un sistema orgánico. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de La Frontera. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Temuco, Chile. 70p.
- Döbereiner, J. and J. M. Day. 1976 Associative symbiosis in tropical grasses: Characterization of micro-organisms and dinitrogen-fixing sites. In: Newton W. E, Nyman C. J (ed) *Nitrogen fixation*. Washington, National Academy Press. 518-538.
- Duarte, B.; I. Bravo y A. Torres. 2003. Caracterización de microorganismos solubilizadores de fósforo con respecto a algunas propiedades químicas del suelo en un agroecosistema asociado de mora de castilla y hortalizas. *Suelos Ecuatoriales* 33 (2): 168 - 174.
- Eivazi, F. and M. A Tabatabai. 1977. Phosphatases in soils. *Soil Biology and Biochemistry* 9: 167-172.
- Franco, C. M. M.; P. P. Michelsen and J. M. Oades. 2000. Amelioration of water repellency: application of slow-release fertilizers to stimulate microbial breakdown of waxes. *J. Hydrol.* 231-232: 342-351.
- Frioni, L. 1999. Procesos microbianos. Editorial de la fundación Universidad Nacional de Río Cuarto. Argentina.

- García, C. y T. Hernández. 2000. Investigación y perspectivas de la Enzimología de suelos en España. CEBAS - CSIC, Murcia. 352.
- García, C.; F. Gil.; Hernández, T. y C. Trasar. 2003. Técnicas de análisis de parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. 371.
- Gianfrenda, L and Bollag, J. 1996. Influence of Natural and Antropogenic Factors on Enzyme Activity in soil. In: Soil Biochemistry. Volumen 9. USA. 123-193.
- Green V. D. Stott and M. Diack. 2006. Assay for fluorescein diacetate hydrolytic activity: Optimization for soil samples. Soil Biol. Biochem. 38: 693-701.
- Hallett, P. D.; N. A. White and K. Ritz. 2006. Impact of basidiomycete fungi on the wettability of soil contaminated with a hydrophobic polycyclic aromatic hydrocarbon. Biología, Bratislava 61 (Supl. 19): S334-S338.
- Inbar, Y., M. J. Boehm, and H. A. J. Hoitink. 1991. Hydrolysis of fluorescein diacetate in sphagnum peat container media for predicting suppressiveness to damping-off caused by *Pythium ultimum*. Soil Biol. Biochem. 23:479-483.
- Jaramillo, J. D. F. 2011. Repelencia al agua en Andisoles de Antioquia. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá. 218.
- Kandeler, E. 2007. Physiological and biochemical methods for studying soil biota and their function. Chapter 3. In: Soil microbiology ecology and biochemistry. 3 ed. Paul E. A. editor. Academic Press. USA. 53 - 83.
- Ko W.H., I.T. Wang and P. J. Ann. 2005. A simple method for detection of lipolytic microorganisms in soils. Soil Biology and Biochemistry. 37: 597–599.
- León, J. D.; W. Osorio.; J. Peláez. y Barreto L. 2008. Ecología de bosques Andinos: experiencias de investigación. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 260 p.
- Linares, N. 1999. Efecto de las bacterias solubilizadoras de fósforo en la producción del cultivo de arroz. Trabajo de grado. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 70p.
- Matsumoto L. S.; A. M. Martines.; M. A. Avanzi.; U.B. Albino.; C. B. Brasil.; D. P. Saridakis.; L. G. L. Rampazo.; W. Zangaro y Andrade G. 2005. Interactions among functional groups in the cycling of carbon, nitrogen and phosphorus in the rhizosphere of three successional species of tropical woody trees. Applied Soil Ecology. 28:57-6.

- McKenna, F.; K. A. El-Tarabily; S. Petrie; C. Chen and B. Dell. 2002. Application of actinomycetes to soil to ameliorate water repellency. *Letters in Applied Microbiology* 35: 107-112.
- Nannipieri, P., E. Kandeler, and P. Ruggeiro. 2003. Enzyme activities and microbiological and biochemical processes in soil. pp 1-33. In: *Enzymes in the environment*. Burns R. and Dick R. (Eds). CRC Press, New York, USA. 640p.
- Narvaez, C. M. 2008. Evaluación de actividad de fosfatasa y deshidrogenasas por efecto de la aplicación de vinaza en suelos cultivados con maíz *Zea mays* L. Trabajo de Grado de la Maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en suelos. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 124.
- Osorio, N. W. 2010. Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad de nutrientes en suelos ácidos del trópico. *Suelos Ecuatoriales* 41 (1):74-91.
- Osorio, N. W. 2009. Microorganismos del suelo y su efecto sobre la disponibilidad y absorción de nutrientes por las plantas. In: *Materia orgánica, biología del suelo y productividad agrícola*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Armenia. 136 p.
- Osorio, N. W and Habte M. 2001. Synergistic influence of an arbuscular mycorrhizal fungus and a P solubilizing fungus on growth and P uptake of *Leucaena leucocephala* in a Oxisol. *Arid Land Research and Management*, 15: 263-274.
- Pérez, C. 2001. Estudio de prospección de los cambios en las actividades biológicas en un Andisol sometido a distintos grados de intervención agrícola. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de La Frontera. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. Temuco, Chile. 98p.
- Raich, J. W. and A. Tufekcioglus. 2000. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. *Biogeochemistry*. 48, 71 – 90.
- Roper, M. M. 2004. The isolation and characterization of bacteria with the potential to degrade waxes that cause water repellency in sandy soils. *Aust. J. Soil Res.* 42: 427-434.
- Roper, M. M. 2006. Potential for remediation of water repellent soils by inoculation with wax-degrading bacteria in south-western Australia. *Biología, Bratislava* 61 (Supl. 19): S358-S362.
- Semple, K. T.; A. W. Moris and G. I. Paton. 2003. Bioavailability of hydrophobic organic contaminants in soils: fundamental concepts and techniques for analysis. *European J. Soil Sci.* 54: 809-818.

- Solange, M. 2007. Evaluación de la actividad enzimática y su relación con el C orgánico y la actividad respiratoria microbiana en un Andisol con distintas rotaciones. Tesis Ingeniería Agrónoma. Facultad de ciencias agronómicas. Escuela de agronomía. Universidad de Chile. 37p
- Speir, T. W. and D. J. Ross. 1978. Soil phosphatase and sulphatase. In: Soil Enzymes; Burns, R.G. (editor). Academic Press, London. 197-250.
- Sylvia, D.; J. Fuhrmann.; P. Hartel and D. Zuberer. 2005. Principles and applications of soil microbiology. 2 ed. Pearson Prentice Hall. New Jersey. 640.
- Tabatabai, M.A. 1994. Soil enzymes. Methods of Soil Analysis, Part 2. Microbiological and Biochemical Properties. Ed. A. Klute. Second Edition. SSSA, Madison. 788-826.
- Wood P.J. 1980. Specificity in the interactions of direct dyes with polysaccharides. Carbohydr. Res. 85:271-287.
- Zahir, A., M. Ateeq and M. Arshad. 2001. Soil enzymes research: A review. Journal of biology sciences 1 (5): 299-307.
- Zibilske L M 1994. Carbon Mineralization. In: Methods of soil analysis, Part 2, Microbiological and Biochemical Properties. Weaver et al. (eds.). Soil Sci. Soc. of America Inc., Wisconsin, USA. 835-863.

A. Anexo1: Cromatogramas de los extractos de las muestras de Andisoles repelentes al agua de la cuenca media de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, bajo cobertura de *Pinus patula*, cobertura natural y suelos con propiedades vérticas del Carmen de Bolívar, lavados con una mezcla de isopropanol – amoníaco (7:3).

Anexo2: Lista de compuestos presentes en muestras de Andisoles repelentes al agua de la parte media de la cuenca de la quebrada Piedras Blancas, oriente antioqueño, y en suelos con propiedades vérticas del municipio del Carmen de Bolívar, llanura Caribe Colombiana